



静的ストレッチ後の運動介入が足関節の柔軟性と筋力に及ぼす影響

著者	武内 孝祐
発行年	2019
学位授与大学	筑波大学 (University of Tsukuba)
学位授与年度	2018
報告番号	12102甲第9135号
URL	http://doi.org/10.15068/00156573

〔博士論文〕

静的ストレッチ後の運動介入が足関節の柔軟性と筋力に及ぼす影響

平成 30 年度

武 内 孝 祐

筑波大学大学院人間総合科学研究科スポーツ医学専攻

目次

第1章 背景	1
1-1. 静的ストレッチングに関して	1
1-2. 柔軟性の指標.....	1
1-3. SS が柔軟性に及ぼす影響	7
1-4. SS がパフォーマンスに及ぼす影響.....	10
1-5. スポーツ現場における SS の利用（柔軟性の観点から）	12
1-6. スポーツ現場における SS の利用（障害予防の観点から）	13
1-7. スポーツ現場における SS の利用（パフォーマンスの観点から）	15
1-8. 本研究の目的.....	17
第2章 本研究の課題	19
第3章 研究課題1：対象者の筋腱複合体スティフネスが SS の効果に及ぼす影響.....	21
3-1. 緒言	21
3-2. 方法.....	22
3-2-1. 対象者.....	22
3-2-2. 実験プロトコル	22
3-2-3. 柔軟性測定	22
3-2-4. 受動的トルク，筋腱複合体スティフネス	23
3-2-5. 筋腱移行部移動量.....	24
3-2-7. 分析方法	27
3-3. 結果.....	28
3-3-1. ROM.....	28
3-3-2. 受動的トルク	28
3-3-3. 筋腱複合体スティフネス	28
3-3-4. 筋腱移行部移動量.....	31
3-3-5. 腱伸長量	31
3-4. 考察.....	33
3-4-1. 両群間における ROM の差異に関して	33
3-4-2. SS の効果	33
3-4-3. 対象者の筋腱複合体スティフネスが SS の効果に及ぼす影響	34

3-5. 結論	35
第4章 研究課題2：筋力向上に効果的なウォームアップ方法の検討	36
4-1. 緒言	36
4-2. 方法	38
4-2-1. 対象者	38
4-2-2. 実験プロトコル	38
4-2-3. ウォームアップ	40
4-2-4. 柔軟性測定	40
4-2-5. 足関節底屈トルク	40
4-2-6. 統計分析	41
4-3. 結果	42
4-3-1. ROM	42
4-3-2. 受動的トルク	42
4-3-3. 筋腱複合体スティフネス	42
4-3-4. 筋腱移行部移動量	43
4-3-5. 足関節底屈トルク	43
4-4. 考察	45
4-4-1. 柔軟性の変化に関して	45
4-4-2. 筋力の変化に関して	46
4-5. 結論	46
第5章 研究課題3：SS後のウォームアップが柔軟性と筋力に及ぼす影響... ..	48
5-1. 緒言	48
5-2. 方法	48
5-2-1. 対象者	48
5-2-2. 実験プロトコル	49
5-2-3. 柔軟性測定	51
5-2-4. 筋力測定	51
5-2-5. SS	52
5-2-6. ペダリング運動	52
5-2-7. 統計分析	52
5-3. 結果	54

5-3-1. ROM.....	54
5-3-2. 受動的トルク	54
5-3-3. 筋腱複合体スティフネス	55
5-3-4. 筋腱移行部移動量.....	55
5-3-5. 足関節底屈トルク	58
5-3-6. EMG	58
5-4. 考察.....	61
5-4-1. 柔軟性の変化に関して	61
5-4-2. 筋力の変化に関して	62
5-5. 結論.....	62
第 6 章 研究課題 4 : SS とウォームアップの順序が柔軟性と筋力に及ぼす影響	
.....	64
6-1. 緒言	64
6-2. 方法.....	64
6-2-1. 対象者.....	64
6-2-3. 実験プロトコル	65
6-2-4. 柔軟性測定	67
6-2-5. 筋力測定	67
6-2-6. SS.....	67
6-2-7. ペダリング運動	67
6-2-8. 分析方法	67
6-3. 結果.....	68
6-3-1. ROM.....	68
6-3-2. 受動的トルク	68
6-3-3. 筋腱複合体スティフネス	68
6-3-4. 足関節底屈トルク	70
6-3-5. EMG	70
6-4. 考察.....	72
6-4-1. 柔軟性の変化に関して	72
6-4-2. 筋力の変化に関して	72
6-5. 結論.....	73

第7章 総合討論.....	74
7-1. 本研究の目的.....	74
7-2. 本研究で得られた成果	74
7-2-1. 研究課題1：対象者の筋腱複合体スティフネスがSSの効果に及ぼす影響.....	74
7-2-2. 研究課題2：筋力向上に効果的なウォームアップ方法	74
7-2-3. 研究課題3：SS後のペダリング運動が柔軟性と筋力に及ぼす影響	75
7-2-4. 研究課題4：SSとペダリング運動の順序が柔軟性と筋力に及ぼす影響	75
7-3. 本研究で得られた成果の意義	76
7-4. 研究の限界	79
第8章 結語.....	81
謝辞.....	83
参考文献.....	84

図一覧

図 1. 角度-トルク曲線とスティフネスの算出.....	6
図 2. 足関節と超音波プローブの固定.....	25
図 3. 筋腱移行部移動量の測定方法.....	26
図 4. 研究課題 2 の実験手順.....	39
図 5. 研究課題 3 の実験手順.....	50
図 6. 研究課題 4 の実験手順.....	66

表一覧

表 1. 静的ストレッチング前後での ROM, 受動的トルク, 筋腱複合体スティフネスの変化.....	30
表 2. 静的ストレッチング前後での筋腱移行部移動量および腱伸長量の変化.....	32
表 3. ウォームアップ前後の各測定項目の変化.....	44
表 4. 静的ストレッチング後の有酸素運動による柔軟性の変化.....	57
表 5. 静的ストレッチング後の有酸素運動による筋力の変化.....	60
表 6. SS と有酸素運動の順序が柔軟性に及ぼす影響	69
表 7. SS と有酸素運動の順序が筋力に及ぼす影響	71

用語の定義と略語

本研究で用いる主な用語の定義と略語は以下の通りである。

柔軟性

身体の関節の可動範囲内で身体運動を円滑に、しかも広範囲に動かすことのできる性能と定義される¹。関節可動域が一般的な指標として用いられている²。本研究では、関節可動域に加えて、筋腱複合体スティフネス、受動的トルク、筋腱移行部移動量を用いることで、詳細に柔軟性の変化を検討している。

関節可動域 (Range of motion ; ROM)

有効に利用できる関節の範囲である³。スポーツ現場において簡便に測定することが可能である。本研究においては他動的に足関節を背屈し、痛みがない範囲で最大の角度を測定している。ROMに影響を及ぼす因子として、下記に説明する軟部組織の伸展性と対象者の痛み耐性がある⁴。

軟部組織の伸展性

関節周囲にある筋や腱などの軟部組織の伸びやすさを意味している。本研究においては、トルク-角度曲線からスティフネスを算出し、軟部組織の伸展性の指標として用いた。トルク-角度曲線の傾きが急峻（スティフネスが高値）

であれば、同じ力に対しての角度変化が少ないということを表しており、軟部組織の伸展性が低い状態と考えられる。反対にトルク-角度曲線の傾きが緩やか（スティフネスが低値）であれば、同じ力に対して大きな角度変化が得られるということを表しており、軟部組織の伸展性が高い状態と考えられる。よって、介入後にスティフネスが低下すれば、軟部組織の伸展性が増加したと考えられる。

痛み耐性

本研究では組織の伸長に対する痛みの感じやすさを痛み耐性とした。ROMは痛みがない範囲で最大の角度で測定されるため、痛み耐性が高い人はより強い力で関節を動かすことができROMは大きな値を示す。本研究では、痛み耐性を定量的に評価するために受動的トルクを用いた。受動的トルクは関節を押し込む強さを反映していることから、受動的トルクの増加は対象者がより強い力に耐えることができたということを意味し、痛み耐性の増加として捉えることができる。

筋腱移行部移動量

本研究では、超音波診断装置のBモードを用いて筋腱移行部を同定し、筋腱

移行部の遠位方向への移動量を筋腱移行部移動量として評価した³．筋腱移行部の遠位方向への移動は筋の伸長を反映していることから，筋腱移行部移動量の変化を筋の伸展性の指標として用いた．

ウォームアップ

スポーツ競技前に行う準備運動のことである．筋収縮を用いて行うActive warm-upと外界からの物理刺激を用いるPassive warm-upに分けられる．Active warm-upとPassive warm-upに該当する日本語用語が定義されていないため，本研究においてはローマ字表記とする．

本博士論文は以下の通り，学術誌に掲載または投稿中である．

研究課題 1

Kosuke Takeuchi, Masahiro Takemura, Toshihiko Shimono, Shumpei

Miyakawa, Baseline muscle tendon unit stiffness does not influence the effects of static stretching on ankle plantar flexor muscles. Journal of Physical Therapy Science. 30: 1377-1380, 2018

研究課題 2

KOSUKE TAKEUCHI, MASAHIRO TAKEMURA, MASATOSHI NAKAMURA, FUMIKO

TSUKUDA, SHUMPEI MIYAKAWA. EFFECTS OF ACTIVE AND PASSIVE WARM-UPS ON RANGE OF MOTION, STRENGTH AND MUSCLE PASSIVE PROPERTIES IN ANKLE

PLANTAR-FLEXOR MUSCLES. Journal of Strength and Conditioning Research.

In press.

研究課題 3

KOSUKE TAKEUCHI, MASAHIRO TAKEMURA, MASATOSHI NAKAMURA, FUMIKO

TSUKUDA, SHUMPEI MIYAKAWA. DOES AEROBIC EXERCISE ENHANCE MUSCKE

STRENGTH DECREASED AFTER STATIC STRETCHING? Journal of Strength and

Conditioning Research. under review.

研究課題 4

Kosuke Takeuchi, Masahiro Takemura, Masatoshi Nakamura, Fumiko

Tsukuda, Shumpei Miyakawa. The effects of using a combination of static stretching and aerobic exercise on muscle tendon unit stiffness and strength in ankle plantar-flexor muscles. Scandinavian Journal of Medicine and Sport Science. under review.

第1章 背景

1-1. 静的ストレッチングに関して

多くのスポーツにおいて競技前にストレッチングが実施されている⁵。ストレッチングには静的ストレッチング (Static Stretching : 以下, SS)⁶、動的ストレッチング⁷、バリスティックストレッチング⁸、PNF ストレッチング⁹など様々な種類がある。日本国内の日本スポーツ協会公認スポーツ指導者を対象に行ったアンケート調査の結果によると、対象となった 140 名のスポーツ指導者のうち 91.4%がストレッチングを利用していることが報告されている¹⁰。また、ストレッチングを実施しているスポーツ指導者の内、SS を利用している者の割合が 93.0%と最も高く、スポーツ現場において特に SS が頻回に利用されていることが明らかとなっている¹⁰。スポーツ指導者が SS を利用している目的は主に柔軟性向上と障害予防である¹⁰。SS は 1975 年に Anderson¹¹により提唱されたものであり、反動をつけることなく筋を伸長し、その姿勢を数十秒間から数分間維持することで実施されるため、実施に際しての安全性が高く、特に柔軟性向上には有効な方法であると考えられている。

1.2. 柔軟性の指標

柔軟性とは関身体の関節の可動範囲内で身体運動を円滑に、しかも広範囲に

動かすことのできる性能と定義され¹、関節可動域（Range of motion：以下、ROM）が一般的な指標として用いられている²。ROM はゴニオメーター、傾斜計、等速性筋力測定装置などを用いて計測され、対象者の痛みがない範囲で最大の角度を ROM として用いる¹²。ROM の低下は関節周囲の軟部組織（皮膚、骨格筋、腱、靱帯、関節包など）に原因がある場合と、関節構成体（関節軟骨、骨など）に原因がある場合がある^{13,14}。足関節背屈 ROM 制限には、筋と腱が 80.5%、皮膚が 9.8%、その他（骨や関節包）が 9.7%関与することが明らかとなっている¹³。また、膝関節伸展可動域制限においては、筋と腱が 46.1%、皮膚が 13.0%、その他（骨や関節包）が 40.9%関与することが明らかとなっている¹⁴。SS の効果は骨には認められず、また、関節包に対しても僅かであることから¹³、SS 後の ROM の変化には筋と腱の伸展性の変化が重要となる。

SS 後に生じる ROM の変化は軟部組織伸展性に加えて、対象者の痛み耐性の影響を受けることが明らかとなっている³。痛み耐性の変化は受動的トルクを用いて評価される¹⁵。受動的トルクは等速性筋力測定装置を用いて測定され、他動的に関節を動かした際に関節から受けるトルクを表している。すなわち、受動的トルクが大きいということは、柔軟性測定時により大きな力で関節を他動的に動かしたことになる。よって、介入後に受動的トルクが増加すれば、対象者はより大きな力に痛みなく耐えることができたということを意味しており、受動的ト

ルクの増加は痛み耐性の増加と考えられる。従って、ROM は対象者の痛み耐性という心理的要因が影響し変化する指標であることから、柔軟性の変化を客観的に評価するためには ROM だけでは十分でなく、軟部組織の伸展性を測定することが重要である⁴。

軟部組織伸展性を評価するために、粘弾性の指標であるスティフネスが考案され、用いられている^{16,17}。スティフネスは関節を他動的に動かした際に生じる受動的トルクと関節角度から得られる角度-トルク曲線の傾きを用いて算出される^{3,18}（図 1）。この角度-トルク曲線の傾きが急峻であるということは、対象組織のスティフネスが高く、同じ力に対しての角度変化が少ないことを意味している。反対に、角度-トルク曲線の傾きが緩やかであることは、対象組織のスティフネスが低く、同じ力に対しての角度変化が大きいことを示している。すなわち、スティフネスは関節運動における抵抗を表しており、その値が小さいということは軟部組織の伸展性が高いということを表している。角度-トルク曲線の傾きから算出されるスティフネスは軟部組織伸展性の指標として先行研究で用いられているが、統一した算出方法は定まっていない。Gissaard et al.¹⁹, Kubo et al.²⁰ および Nakamura et al.^{3,18} は、足関節背屈 15～25° 間の角度-トルク曲線の傾きをスティフネスとして用いている（図 1）。一方, Kataura et al.²¹ や Matsuo et al.²² は各測定時の角度-トルク曲線において、それぞれの曲線の最終

50%での傾きを算出し、スティフネスとして用いている。それぞれの先行研究でスティフネスの算出方法に違いはあるが、SS 後にはスティフネスが低下することによって一定の結果が得られている。よって、本研究では、先行研究において最も多く使用されていた足関節背屈 15° ～ 25° 間の傾きをスティフネスとして定義し、軟部組織伸展性の指標として用いた。

スティフネスが高いことは障害発生のリスクファクターとなること²³、スティフネスがジャンプパフォーマンス⁴や筋力と正の相関があること²³が報告されており、スティフネスは軟部組織の伸展性をとらえるだけではなくパフォーマンスや障害予防の観点からも重要な指標であることが明らかとなっている。

近年では SS の効果を評価するために超音波診断装置が用いられている^{3, 12, 15, 18, 20, 24-32}。SS の対象となる筋腱複合体は、筋や腱、関節包などにより構成されるが、従来のスティフネスを指標とした場合には、筋腱複合体のうちどの組織の伸展性が変化したのかを特定することはできない。しかし、超音波診断装置を用いて、筋腱移行部移動量を測定することで、筋の伸展性の変化を区別して評価することができる^{3, 20, 25}。超音波診断装置を用いた筋腱移行部移動量の算出方法に関しては高い信頼性が報告されている ($ICC = 0.98$)³。また、足関節底屈筋群においては、足関節背屈角度を用いた以下の回帰式により、足関節背屈時の筋腱複合体全体の伸長量を算出することができる³。

$$\text{筋腱複合体伸長量} = -22.185 + 0.30141(90 + \theta A) + 0.00061(90 + \theta A)^2$$

回帰式における θA は足関節背屈角度である.

回帰式から得られた筋腱複合体全体の伸長量から, 超音波診断装置を用いて算出された筋腱移行部移動量を差し引くことで腱伸長量を求めることができる

³. すなわち, 超音波診断装置を用いることで, 筋と腱の伸展性の変化をそれぞれ区別して評価することが可能である.

上述の通り, 超音波診断装置を用いることで, SS 後の筋と腱の伸展性の変化をそれぞれ検討することができる. しかし, 適応は筋腱移行部が明確に確認できる筋に限られ, 先行研究では腓腹筋のみを対象としている¹².

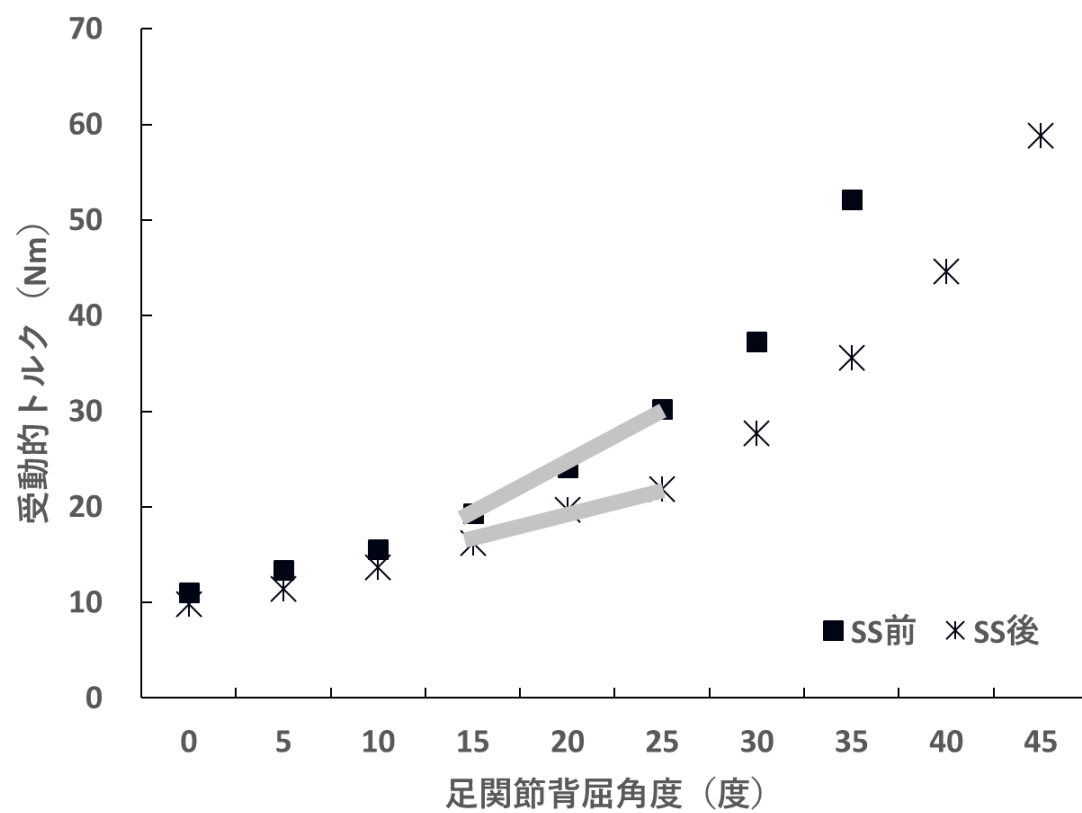


図 1. 角度-トルク曲線とスティフネスの算出

1-3. SS が柔軟性に及ぼす影響

SS が ROM に及ぼす影響は数多く研究されており，SS 後には ROM が増加することが明らかとなっている^{19, 28, 33-42}．Bandy et al.³⁵は若年成人のハムストリングスを対象に 15 秒，30 秒，60 秒間の SS をそれぞれ 6 週間実施し，30 秒間以上の SS を継続することで効率的に ROM を向上することができることを報告している．また，Feland et al.⁴³は 65 歳以上のハムストリングスを対象として，15 秒，30 秒，60 秒間の SS をそれぞれ 6 週間実施し，60 秒間以上の SS を継続することで効率的に ROM を向上することができることを報告している．これらの結果から，SS が ROM に及ぼす影響は年齢により影響を受ける可能性があることが示唆されている．また，Marques et al.⁴³は ROM 増加に効果的な SS の実施頻度（1 回 2 分，週 1 回，週 3 回，週 5 回，各 4 週間）を検討し，ROM 増加には週 3 回の SS が効果的であることを報告している．加えて，Kataura et al.²¹は痛みがない範囲で最大強度の SS を 100%とした際の 80%，100%，120%強度の SS の効果を比較し，ROM 増加には 120%強度の SS が効果的であることを明らかにしている．よって，これまでの先行研究により，若年男性の ROM 増加には 30 秒間，週 3 回，高強度の SS が効果的であることが明らかとなっている．

SS 後に生じる ROM 増加は軟部組織伸展性と痛み耐性の増加により生じる^{12, 15, 24, 25}．前述の通り，軟部組織伸展性と痛み耐性の変化は，それぞれスティフ

ネスと受動的トルクを用いて評価される。Mizuno et al.¹⁵は足関節底屈筋群を対象に5分間のSSを実施したところ、ROM増加、筋腱複合体スティフネス低下、受動的トルク増加が生じたことを報告している。また、Guissard et al.¹⁹はSS後に生じるROMの増加は筋腱複合体スティフネス減少および受動的トルク増加と相関していることを明らかにしている。これらの先行研究のように、SS後にはROM増加に加えて、筋腱複合体スティフネス減少と受動的トルクの増加が生じることが明らかとなっている。SS後に生じるスティフネスの低下はSSの持続時間の影響を受ける。Ryan et al.⁴⁴はSS中の筋腱複合体スティフネスの変化を経時的に観察し、筋腱複合体スティフネスを減少させるためには60秒間以上のSSを実施する必要があることを報告している。

SS後に筋腱複合体スティフネスが低下する要因として、力学的要因と神経的要因がある。力学的要因として筋束長の変化がある。SS後の筋腱複合体スティフネスの変化と筋束長の変化には負の相関があることが報告されており、SS後には筋束長の増加による筋腱複合体スティフネスの低下が生じる²⁸。また、神経的要因として関節運動時に生じる伸張反射が考えられる。先行研究では、SSを継続的に実施することで、関節運動時の伸張反射が抑制されることが報告されており、SS後の筋腱複合体スティフネス減少に伸張反射の抑制が関与している可能性が示唆されている⁴⁵。健常者と完全脊髄損傷者に対するSSの効果を比較

した研究では、両者ともに同一角度での受動的トルクは低下し、その程度に差はなかったことが報告されている⁴⁶。このことから、SS による筋腱複合体スティフネスの変化には力学的要因と神経的要因がともに関与しているが、力学的要因の方がより強く関与していると考えられる。

また、SS 後の ROM 増加には痛み耐性の変化が関与することは数多く報告されているが、痛み耐性が変化する要因に関して現在のところ明らかにはなっていない。Weppeler et al.⁴⁷のレビューでは、SS による心理的なリラックス効果が関与する可能性が指摘されているが、その詳細なメカニズムに関しては明らかとなっていない。

近年では、SS による筋と腱の伸展性の変化をそれぞれ検討するために超音波診断装置が用いられている^{25,28}。しかし、SS が筋と腱の伸展性に及ぼす影響に関しては一定の結果が得られていない^{25,28}。Kato et al.²⁸は最大等尺性筋力の15%の強度でSSを20分間実施し、SS後にはROM増加と腱スティフネス低下が生じるが、筋スティフネスに変化が生じなかったことを報告している。一方、Morse et al.²⁵は5分間のSS後にはROM増加と筋伸長量の増加が生じ、腱伸長量は変化しなかったことを報告している。このように先行研究において一定の結果が得られていない原因は明らかとはなっていないが、対象者のスティフネスの違いが一因となっている可能性がある。Abellana et al.⁴⁸は足関節底屈筋群の

受動的スティフネスを用いて対象者を群分けし、他動的に足関節を背屈した際の筋と腱の伸長量の違いを検討している。その結果、受動的スティフネス低値群は高値群と比較して足関節背屈時の筋伸長量が大きいことを報告している。これらの結果は、対象者のスティフネスが足関節背屈時の筋と腱の貢献度に影響を及ぼしていることを示唆するものである。Freitas et al.⁶はSSの強度はSSの効果に大きな影響を及ぼしていることを報告している。よって、対象者のスティフネスにより筋と腱の伸長量が異なるのであれば、SSが筋と腱に及ぼす影響もそれぞれの対象者で変化する可能性が考えられる。しかし、対象者のスティフネスがSSの効果に及ぼす影響は検討されていない。

1-4. SSがパフォーマンスに及ぼす影響

SS後には筋力やジャンプ能力など様々なパフォーマンスが低下する^{24, 36, 44, 49-57}。Favero et al.⁵⁸はハムストリングス、殿筋、足関節底屈筋群を対象にそれぞれ90秒間のSSを実施し、その結果、スプリント能力が低下したことを報告している。また、Cramer et al.⁵⁹は大腿直筋を対象に2分間のSSを実施したところ、SS直後には膝伸展トルクとEMGが減少したことを報告している。加えて、Gergley⁶⁰は若年ゴルフ選手を対象に全身の筋に対して合計20分間のSSを実施したところ、実施直後にはドライバーのヘッドスピード、飛距離、精度が減少し、

更にそれは 60 分後も継続していたことを明らかにしている．このように SS 直後から生じるパフォーマンス低下のために，SS は柔軟性向上⁵と筋障害の予防⁶¹⁻⁶³に効果的であるにも関わらず，競技前に SS を取り入れることの問題が指摘されている．

SS 後にパフォーマンスが低下する要因として，力学的な要因と神経学的な要因がある^{16,64}．力学的な要因には軟部組織の粘弾性が関係する^{16,23}．軟部組織の粘弾性が高く抵抗の高い組織は力の伝導効率が高く，筋などの収縮組織から生み出された力を効率よく伝えることができる²³．すなわち，SS により筋腱複合体スティフネスが低下（粘弾性が低下）することで，筋収縮により生み出された力の伝導効率が低下し，筋力低下が生じる^{15,65}．神経学的な要因としては，筋活動が関係している²⁹．Mizuno et al.^{24,65}は足関節底屈筋群を対象に 5 分間の SS を実施したところ，実施直後には足関節底屈筋力低下，筋腱複合体スティフネス低下，EMG 低下が生じたことを報告している．加えて，SS 後に低下した足関節底屈トルクと筋腱複合体スティフネスはともに SS 後 10 分で改善しており，SS 後に生じる筋力低下と筋腱複合体スティフネスの関係性が示されている．

Simic et al.⁶⁶のメタアナリシスによると，SS 後に生じるパフォーマンスの低下には SS の持続時間が関係し，45 秒間以上の SS を実施するとパフォーマンスは低下する．しかし，前述の通り Ryan et al.⁴⁴はスティフネスを低下させる

ためには、60 秒間以上の SS が必要であることを報告している。SS 後に生じるパフォーマンス低下にはスティフネス低下が関係することを考えると、SS の持続時間が延長することでスティフネスが低下し、その結果、パフォーマンス低下が生じることが考えられる。よって、SS のみでは柔軟性向上とパフォーマンス向上を両立することは難しいことが考えられる。

1-5. スポーツ現場における SS の利用（柔軟性の観点から）

スポーツ競技前には、柔軟性向上、パフォーマンス向上、障害予防を目的に有酸素運動、SS、競技特異的な運動が実施される⁵。前述の通り、SS 後に ROM 増加と筋腱複合体スティフネス低下が生じることが明らかとなっており、SS は柔軟性向上に有効である^{12,25}。一方、有酸素運動や競技特異的な運動後の柔軟性の変化に関しては一定の見解が得られていない。De Weijer et al. は 70%HRmax（10 分間）のクライミングエクササイズ後には膝伸展 ROM は増加したことを報告しているが⁶⁷、O'Sullivan et al. は低強度のジョギング後（5 分間）には膝伸展 ROM は変化しなかったことを報告している⁶⁸。先行研究において一定の見解が得られていない原因として、柔軟性の指標として ROM のみを用いていることが考えられる^{55,69,70}。前述の通り ROM は対象者の痛み耐性の影響を受け変化をするため、ROM のみを用いて柔軟性を評価することの問題点が指摘されてい

る¹⁷。客観的に柔軟性を評価するためには筋腱複合体スティフネス、受動的トルク、筋腱移行部移動量などを用いて、軟部組織の伸展性の変化を客観的にとらえる必要がある。Mizuno et al.⁷¹は動的ストレッチング後が下腿三頭筋に及ぼす影響を検討し、動的ストレッチング後にはROMは増加したが、筋腱移行部移動量および筋腱複合体スティフネスは変化しなかったことを報告している。

以上より、柔軟性向上、特に軟部組織伸展性向上を目的とする場合にはSSを実施することが必要となることが考えられる。

1-6. スポーツ現場におけるSSの利用（障害予防の観点から）

スポーツ障害の発生には柔軟性の低下が関係する⁷²⁻⁷⁵。Kaufman et al.⁷⁶は軍隊志願者449名を対象に2年間の前向き調査を行い、アキレス腱炎の発生には足関節背屈可動域の低下が関係していることを明らかにしている。また、Witvrouw et al.⁷³は198名の体育大学生を対象に2年間の前向き調査を行い、膝蓋腱炎の発生にはハムストリングスと大腿四頭筋の柔軟性低下が関係していることを報告している。これらの報告に加えて、シンスプリント⁷²、グローインペイン⁷⁵、腰痛⁷⁷など様々なスポーツ障害発生のリスクファクターとして柔軟性低下が報告されている。

先行研究において、下肢筋のスティフネスが高いことが非接触型のスポーツ障害発生の一因となることが明らかとなっている^{23,62,78}。スティフネスが高いということは、軟部組織の抵抗が高いということを示しており、地面に接地した際の衝撃級能力は低くなる。実際に、スティフネスとランニング中の床反力の大きさには正の相関があることが明らかとなっており、スティフネスが高くなるとランニング時に下肢が受けるストレスが大きくなる^{79,80}。また、動作時の床反力のピークトルクの増加は疲労骨折などのリスク増加につながるということが明らかとなっている⁸¹。よって、スポーツ障害を予防する上でスティフネスを低下させることが重要であると考えられ、スティフネス低下に効果的な手段である SS が障害予防を目的に利用されている。

SS により障害予防が可能であるかは数多く検討されている^{61-63,82-84}。Amako et al.⁶³ は 901 人の軍人を対象に SS が障害発生に及ぼす影響を検討している。訓練前に 20 分間の SS を実施した SS 実施群は非実施群と比較して、筋腱障害の発生率が低下し、骨折や靭帯損傷の発生率は変化していなかった。また、Bixler and Jones⁸⁵ はアメリカンフットボール選手においては SS を実施することで肉離れ損傷を予防することが可能であることを報告している。一方で、van Mechelen et al.⁸² は 326 名のランナーを介入群（167 名）とコントロール群（159 名）に割り振り 16 週間にわたり障害の発生状況を確認している。介入

群では SS を含むエクササイズを実施している。その結果、群間で障害発生率に差がなかったことを報告しており、ランナーにおいて SS が障害予防に有効的でなかったと結論付けている。SS と障害予防の関係を調査した Lauersen et al.⁸⁶ や Jeppe et al.⁸⁶ のシステマティックレビューによると、SS により全ての障害を予防することはできないことが報告されている。しかし、障害別に SS の効果を検討すると、肉離れなどの急性の筋損傷においては、SS による障害予防が可能であることが明らかとなっている⁶¹⁻⁶³。Ekstrand et al.⁶², Bixler et al.⁸⁵, Hadala et al.⁶¹ はそれぞれサッカー選手、アメリカンフットボール選手、ヨット選手を対象に SS が障害予防に及ぼす影響を調査し、肉離れなどの急性の筋障害に関しては予防効果があるとの結論で一致している。

以上より、SS は軟部組織伸展性を増加させることで筋障害の発生を予防することが可能であり、筋障害の予防を目的とする場合には、競技前に SS を取り入れることが有効であると考えられる。

1-7. スポーツ現場における SS の利用（パフォーマンスの観点から）

SS 後には筋力やジャンプ能力など様々なパフォーマンスが低下することが明らかとなっており、競技前に SS を利用することの問題点が指摘されている^{24, 36, 44, 49-57}。SS 後に生じるパフォーマンスの低下には軟部組織伸展性^{15, 65} と筋活

動の低下が関係している²⁹。

一方、スポーツ競技前には、パフォーマンス向上を目的にウォームアップが実施される。ウォームアップによるパフォーマンスの増加には筋温および体温の上昇⁸⁷、軟部組織伸展性の変化⁸⁸、筋代謝の亢進^{89,90}、筋活動向上（post activation potentiation : PAP）^{91,92}、精神的準備⁹²が起因している。SS後に生じる筋力低下が軟部組織伸展性と筋活動の低下に起因していることを考えると、SSとウォームアップを併用することで、SS後に生じる筋力低下を改善できる可能性が考えられる。

ウォームアップはActive warm-upとPassive warm-upに分けられる^{88,90}。さらにActive warm-upは有酸素運動と無酸素運動に分類される。Active warm-upは身体活動を伴い、筋温増加や代謝・循環亢進に有効である^{70,93,94}。一方、Passive warm-upは温熱刺激など外界からの物理的刺激を用いたウォームアップであり筋温上昇に効果的である^{55,70,93-95}。

有酸素運動の効果はその強度に関係があり、パフォーマンス向上には60% $\dot{V}O_{2max}$ 以下の低強度が有効である^{90,96}。高強度の有酸素運動直後には疲労の蓄積によりパフォーマンスが低下する⁹⁷。また、最大随意収縮などの無酸素運動後には筋活動の亢進（PAP）により筋力が増加する⁹⁸。PAPとは筋収縮後に生じる筋活動の一時的な増加を意味している⁹⁹。Young et al.¹⁰⁰は最大強度のスクワ

ットエクササイズ後にはジャンプパフォーマンスが増加することを報告している。また，Güllich et al.⁶⁹は最大等尺性筋収縮後には筋活動が増加し，筋力が向上することを報告している。以上より，低強度の有酸素運動と高強度の無酸素運動後（最大等尺性収縮など）はともに筋力が増加する可能性があるしかし，それらの効果を比較した研究はなされておらず，有酸素運動と無酸素運動どちらの方が効果的に筋力を増強できるのかは明らかでない。

以上より，SS 直後に生じるパフォーマンスの低下が，スポーツ競技前に SS を行う上での問題点となっている。しかし，SS とウォームアップを併用することで，SS 後に生じるパフォーマンスの低下を改善することができる可能性が考えられる。

1-8. 本研究の目的

本研究では，SS 後に生じる筋力の低下を改善することができる方法を明らかにすることを目的とする。

SS は柔軟性向上と障害予防に非常に有効な手段である。しかし，SS 後には筋力低下が生じるため，スポーツ競技前に SS を用いることの問題点が指摘されている。よって，SS 後に生じる筋力低下を改善することができる方法が明らかになれば，スポーツ競技前のウォームアッププログラムを立案する際に有用な知

見が得られると考える。

この目的を達成するためにはまず、SS が筋と腱にどのような影響を及ぼすのかを明らかにする必要がある。SS が筋と腱に及ぼす影響は一定の見解が得られていないが、その一因として対象者のスティフネスの違いが考えられる。そこで、研究課題 1 では、対象者のスティフネスが SS の効果に及ぼす影響を明らかにすることから研究を進める。また、ウォームアップは Active warm-up（有酸素運動、無酸素運動）と Passive warm-up（温熱刺激など）に区分されるが、筋力向上に有効なウォームアップは明らかでない。そこで、研究課題 2 では有酸素運動、無酸素運動、温熱刺激が筋力に及ぼす影響を比較し、筋力向上に効果的なウォームアップ方法を明らかにする。研究課題 3, 4 では、SS とウォームアップの併用効果を検討する。

第2章 本研究の課題

本論文は、以下の4つの研究課題から構成されている。

研究課題1：対象者の筋腱複合体スティフネスがSSの効果に及ぼす影響

客観的な柔軟性の指標である筋腱複合体スティフネスを用いて対象者を群分けし、対象者の筋腱複合体スティフネスがSSの効果に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

研究課題2：筋力向上に効果的なウォームアップ方法の検討

Active warm-up と Passive warm-up が足関節底屈筋群の柔軟性と筋力に及ぼす影響を比較・検討し、筋力向上に有効なウォームアップ方法を明らかにすることを目的とした。

研究課題3：SS後のウォームアップが柔軟性と筋力に及ぼす影響

SS後に研究課題2で得られたウォームアップを実施し、柔軟性と筋力にどのような影響を及ぼすのかを明らかにすることを目的とした。

研究課題4：SSとウォームアップの順番が柔軟性と筋力に及ぼす影響

SS 前，SS 後，SS 前後にウォームアップを実施し，SS とウォームアップの順序が足関節の柔軟性と筋力に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした．

第3章 研究課題1：対象者の筋腱複合体スティフネスがSSの効果に及ぼす影響

3-1. 緒言

超音波診断装置を用いることで、筋と腱の柔軟性の変化を区別して捉えることができる。しかし、SS後に筋と腱どちらの柔軟性が向上するかに関しては一定の見解が得られていない。Morse et al.²⁵, Kay et al.³⁰, Mizuno et al.¹⁵はSS後には筋の柔軟性が向上していることを報告している。一方, Kato et al.²⁸, Kubo et al.^{20, 32}はSS後には腱の柔軟性が向上していることを報告している。先行研究において一定の結果が得られていない原因として、対象者のスティフネスの違いが考えられる。Abellana et al.⁴⁸は受動的スティフネスが低い者は足関節背屈時に筋がより大きく伸長されることを報告しており、スティフネスが筋と腱の伸長に影響を及ぼしていることが明らかとなっている。対象者のスティフネスの違いにより伸長される組織が変化するのであれば、SSの効果を受ける組織も変化する可能性が考えられる。

以上より、本研究の目的は、対象者の筋腱複合体スティフネスがSSの効果に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

3-2. 方法

3-2-1. 対象者

対象は運動習慣のない健常男性 18 名（年齢 24.3 ± 1.7 歳，身長 173.0 ± 5.7 cm，体重 64.4 ± 6.1 kg）とし，対象筋は利き足の腓腹筋とした．除外基準は神経障害の既往がある者，下肢に手術歴がある者とした．本研究はヘルシンキ宣言に則り実施した．全ての対象者には実験の趣旨や研究方法に関する説明を行った．また，実験への参加は任意であること，実験への参加を途中で取り止めたとしても何ら不利益を生じることが無いことを説明し，研究の参加に関する同意を得た．また，本研究は事前に筑波大学人間総合科学研究科倫理委員会の承認を得た上で実施した（承認番号 25-82）．

3-2-2. 実験プロトコル

対象者の筋腱複合体スティフネスが SS の効果に及ぼす影響を明らかにするために，10 分間の SS 前後で柔軟性測定を行った．実験中は実験室の室温を 25 度に維持した．

3-2-3. 柔軟性測定

柔軟性測定には等速性筋力測定装置（Biodex system 4, Sakai medical Co.,

Japan) および超音波診断装置 (HI VISION Preirus, Hitachi Aloka Medical, LTD, Japan) を用いた。対象となる利き足の足関節を膝関節伸展位にて等速性筋力測定装置のフットプレートに固定した。固定に際して足関節の運動軸と Biodex のダイナモメータの軸が一致するよう注意を払った。本研究ではフットプレートが床面に対して垂直な角度を足関節底背屈 0 度として定義した。痛みがない範囲で最大の角度まで足関節を 5 度/秒の角速度で他動的に背屈することで柔軟性を測定した。先行研究において各速度 5 度/秒以下であれば柔軟性測定において伸張反射が生じないことが報告されている¹⁰⁾。柔軟性の測定項目は、ROM、受動的トルク、筋腱複合体スティフネス、筋腱移行部移動量、腱伸長量とした。ROM は痛みがない範囲で最大の足関節背屈角度と定義した^{3, 12, 18)}。柔軟性測定中は対象者にリラックスして行うよう指示をした。

3-2-4. 受動的トルク、筋腱複合体スティフネス

他動的に足関節を背屈した際にフットプレートに生じる底屈方向のトルクを受動的トルクとして記録した。分析には足関節最大背屈角度における受動的トルクの値を用いた。受動的トルクの増加は、柔軟性測定時により大きな力で足関節を押し込んだということを意味している。本研究においては痛みがない範囲で最大の角度まで足関節を他動的に背屈していることから、受動的トルクが増

加すればより大きな刺激に耐えることができるようになったということの意味するものである．すなわち，受動的トルクの変化を検討することで，対象者の痛み耐性の変化を検討することができる^{39, 102}．

また，受動的トルクと足関節背屈角度から得られるトルク-角度曲線における，足関節背屈 15 度から 25 度の傾きを筋腱複合体スティフネスとして算出した¹⁶（図 1）．

3-2-5. 筋腱移行部移動量

超音波診断装置の B モードを用いて筋腱移行部移動量の評価を行った．Maganaris et al¹⁰³を参考に対象側の腓腹筋内側頭の筋腱移行部を同定し，測定中にプローブがずれないように固定した（図 2）．また，筋腱移行部移動量を算出する際の基準となる音響反射マーカ―を皮膚表面に貼付した．筋腱移行部から音響反射マーカ―までの距離を Image J 1.45S (National Institutes of Health) を用いて算出した（図 3）．足関節背屈時には筋腱移行部は遠位方向へ移動し，筋腱移行部移動量の増加は筋伸長量の増加としてとらえることが可能である³．



図 2. 足関節と超音波プローブの固定

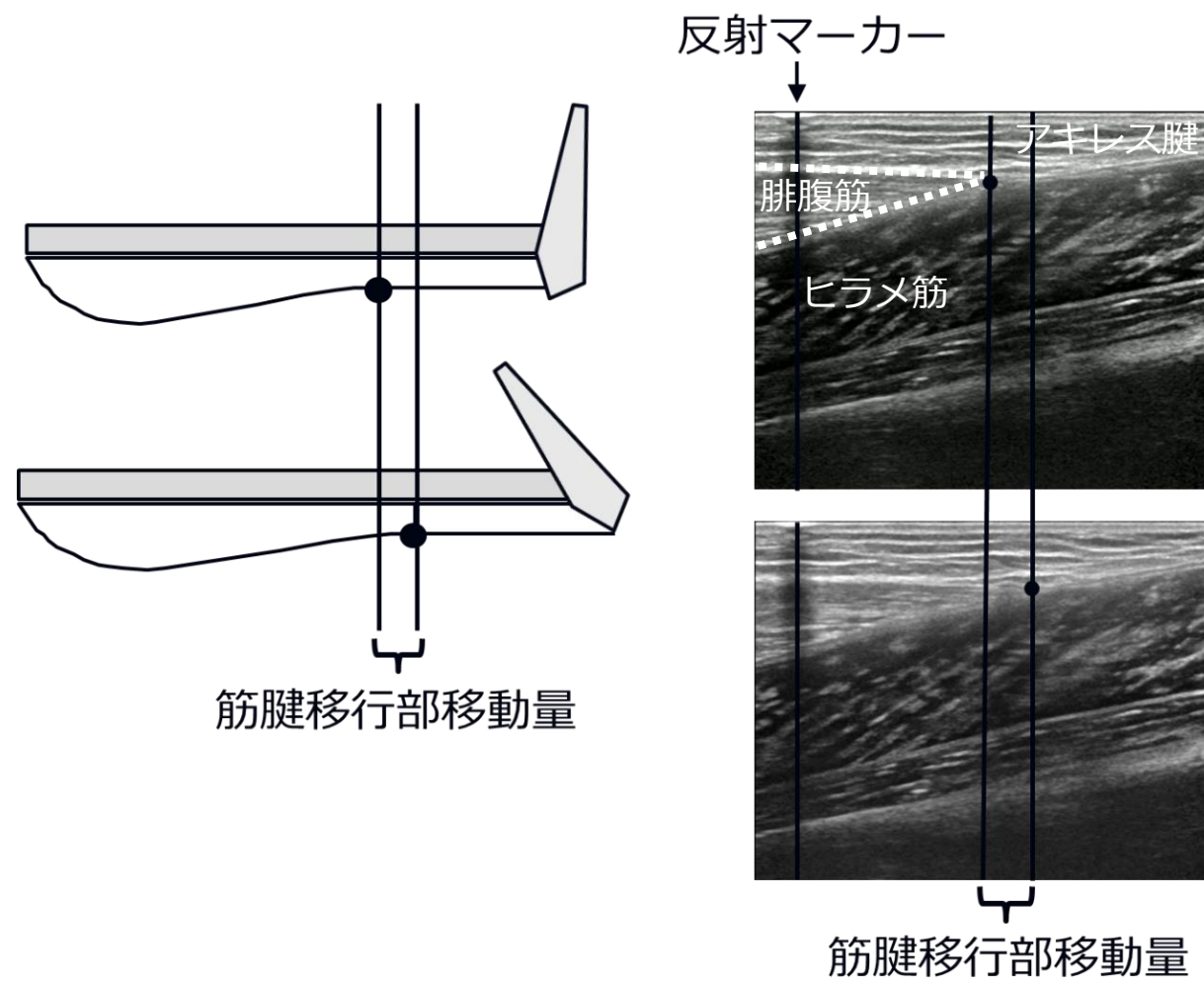


図 3. 筋腱移行部移動量の測定方法

3-2-6. 腱伸長量

筋腱複合体全体の伸長量を以下の回帰式を用いて算出した^{15, 104}.

$$\text{筋腱複合体伸長量} = -22.185 + 0.30141(90 + \theta A) + 0.00061(90 + \theta A)^2$$

上記の回帰式において θ は足関節背屈角度である. また上記回帰式において

正の値は足関節背屈を意味している.

腱伸長量は筋腱複合体伸長量から筋腱移行部移動量を差し引くことで算出した

^{15, 104}.

3-2-7. 分析方法

対象者のうち, 筋腱複合体スティフネスが平均よりも低値であった 9 名を Low stiffness 群 (以下 LS 群), 平均よりも高値であった 9 名を High stiffness 群 (以下 HS 群) に群分けした. 得られたデータは平均値 \pm 標準偏差で記載した. 統計分析には反復測定二元配置分散分析を用いた [群 (LS 群 vs HS 群) \times 時間 (pre vs post)]. 事後検定は Bonferroni 法を用いて行った. 全ての統計分析は SPSS statistics ver. 20 (IBM, Japan)を用いて行い, 有意水準は 5%未満とした.

3-3. 結果

3-3-1. ROM

時間と条件の間に有意な交互作用は認められなかった ($p = 0.86$, partial eta squared = 0.00, 表 1). 群 ($p < 0.05$, partial eta squared = 0.46) および時間ともに有意な単純主効果がみられた ($p < 0.05$, partial eta squared = 0.92). ROM は両群ともに SS 後に増加した ($p < 0.05$). また, LS 群は HS 群と比較して高値を示した ($p < 0.05$).

3-3-2. 受動的トルク

時間と条件の間に有意な交互作用は認められなかった ($p = 0.60$, partial eta squared = 0.00, 表 1). 時間には有意な単純主効果がみられたのに対して ($p < 0.05$, partial eta squared = 0.66), 群には単純主効果はみられなかった ($p = 0.24$, partial eta squared = 0.00). 両群ともに SS 後に受動的トルクは増加した ($p < 0.05$).

3-3-3. 筋腱複合体スティフネス

時間と条件の間に有意な交互作用は認められなかった ($p = 0.56$, partial eta squared = 0.05, 表 1). 群 ($p < 0.05$, partial eta squared = 0.57) および

時間 ($p < 0.05$, partial eta squared = 0.80) ともに有意な単純主効果がみられた。筋腱複合体スティフネスは両群ともに SS 後に低下した ($p < 0.05$, 表 1) 。LS 群は HS 群と比較して低値を示した ($p < 0.05$) 。

表 1. 静的ストレッチング前後での ROM, 受動的トルク, 筋腱複合体スティフネスの変化

	LS 群		HS 群	
	pre	Post	pre	Post
ROM (度)	37.8 ± 5.4	43.2 ± 6.7*	31.6 ± 3.7 [#]	37.2 ± 3.7* [#]
受動的トルク (Nm)	28.5 ± 10.8	34.7 ± 12.0*	29.1 ± 8.7	34.0 ± 11.1*
筋腱複合体スティフネス (Nm/度)	0.65 ± 0.12	0.53 ± 0.08*	0.97 ± 0.14 [#]	0.79 ± 0.15* [#]

平均値 ± 標準偏差. LS 群 : Low stiffness 群. HS 群 : High stiffness 群. *p < 0.05 (vs pre). [#] p < 0.05 (vs LS 群).

3-3-4. 筋腱移行部移動量

時間と条件の間に有意な交互作用は認められなかった ($p = 0.34$, partial eta squared = 0.26, 表 2). また, 時間 ($p < 0.05$, partial eta squared = 0.84) と群 ($p < 0.05$, partial eta squared = 0.92) 共に有意な単純主効果は認められた. 両群ともに SS 後に筋腱移行部移動量は増加した ($p < 0.05$). また, LS 群は HS 群と比較して高値を示した ($p < 0.05$).

3-3-5. 腱伸長量

時間と条件の間に有意な交互作用が認められなかった ($p = 0.23$, partial eta squared = 0.02, 表 2). 事後検定の結果, 時間にのみ有意な単純主効果が認められた ($p < 0.05$, partial eta squared = 0.67). 両群ともに腱伸長量は SS 後に増加した ($p < 0.05$).

表 2. 静的ストレッチング前後での筋腱移行部移動量および腱伸長量の変化

	LS 群		HS 群	
	pre	post	pre	post
筋腱移行部移動量 (cm)	1.74 ± 0.22	1.84 ± 0.27*	1.26 ± 0.36 [#]	1.38 ± 0.36* [#]
腱伸長量 (cm)	0.86 ± 0.25	1.09 ± 0.37*	1.02 ± 0.35	1.22 ± 0.35*

平均値 ± 標準偏差. LS 群 : Low stiffness 群. HS 群 : High stiffness 群. * $p < 0.05$ (vs pre). [#] $p < 0.05$ (vs LS 群).

3-4. 考察

3-4-1. 両群間における ROM の差異に関して

両群間において ROM, 筋腱複合体スティフネスおよび筋腱移行部移動量に関しては差が認められた。一方, 受動的トルクと腱伸長量に関して差は認められなかった。ROM は軟部組織伸展性と痛み耐性の影響を受け変化する^{19,24}。本研究においては, 軟部組織伸展性と痛み耐性は, それぞれ筋腱複合体スティフネスと受動的トルクを用いて検討し, 筋腱複合体スティフネスのみ群間で差が認められた。よって, 両群間における ROM の差は筋腱複合体スティフネスの差によるものであると考えられる。筋腱複合体スティフネスの変化は筋の柔軟性の変化に相関する^{15,29}。本研究において筋の柔軟性は筋腱移行部移動量を用いて評価した。Kato et al.²⁹ は SS 中の受動的トルクの変化は筋束長の変化と負の相関があることを報告している。さらに, Mizuno et al.¹⁵ は筋腱複合体スティフネスの低下は筋スティフネスの低下により生じることを報告している。本研究においては, ROM, 筋腱複合体スティフネス, 筋腱移行部移動量はそれぞれ両群間で差が認められた。以上より, 両群間における ROM の差は筋の柔軟性が影響していることが考えられる。

3-4-2. SS の効果

10 分間の SS 後に ROM および受動的トルクは両群ともに増加し、筋腱複合体スティフネスは両群ともに減少した。これらの変化は先行研究と一致している^{28, 105}。Kato et al.²⁸は 10 分間の SS 後には足関節背屈可動域が 5 度増加することを報告している。また、Mizuno et al.²⁴は 5 分間の SS 後に生じる ROM 増加は筋腱複合体スティフネス減少と受動的トルク増加により生じることを報告している。本研究では 10 分間の SS 後に筋腱移行部移動量と腱伸長量が両群ともに増加した。Nakamura et al.¹⁸は超音波診断装置を用いて SS 中の筋腱移行部移動量の変化を経時的に観察し、筋腱移行部移動量の増加には 2 分間以上の SS が効果的であることを報告している。一方、SS 中の腱伸長量を経時的な変化は検討されていない。しかし、5 分間の SS 後には腱の柔軟性は変化しないことが報告されているのに対して^{15, 25, 30}、10 分間の SS 後には腱の柔軟性が増加することが報告されている^{28, 32}。これらの結果から、10 分間の SS は筋と腱を共に増加することができる時間であったと考えられる。

3-4-3. 対象者の筋腱複合体スティフネスが SS の効果に及ぼす影響

Abellanedo et al.⁴⁸はスティフネスが低い者は足関節背屈時の筋の伸長量の貢献が大きいことを報告している。本研究において、LS 群は HS 群と比較して筋腱移行部移動量は高値を示しており、この結果は Abellanedo et al.⁴⁸の研究結

果と同様であった。しかし、10 分間の SS 後に ROM、筋腱複合体スティフネス、受動的トルク、筋腱移行部移動量、腱伸長量の変化は両群間で差はなかった。これらの結果は、対象者のスティフネスが SS の効果に影響を及ぼさないことを示唆するものである。SS の効果に影響を及ぼす因子として SS の強度がある²¹。本研究において両群間で受動的トルクに差がなかったことから、SS の強度に群間で差がなかったと考えられる。SS の強度が両群間において同一であったことが、両群間において SS の効果に差がなかった一因であった可能性が考えられる。

3-5. 結論

研究課題 1 では、客観的な柔軟性の指標である筋腱複合体スティフネスを用いて対象者を群分けし、SS の効果を検討した。その結果、SS 後には筋腱複合体スティフネス減少と痛み耐性の増加により ROM が増加することが明らかとなった。両群間における ROM の違いは筋腱複合体スティフネスおよび筋腱移行部移動量の違いによるものである可能性が示唆された。また、対象者の筋腱複合体スティフネスは SS の効果に影響を及ぼさないことが明らかとなった。

第4章 研究課題2：筋力向上に効果的なウォームアップ方法の検討

4-1. 緒言

スポーツ競技前には柔軟性向上、パフォーマンス向上および障害予防を目的にウォームアップが実施される。ウォームアップは筋収縮を用いて行う Active warm-up と外界からの物理的な刺激を用いて行う Passive warm-up に区別される^{88,90}。さらに Active warm-up は有酸素運動と無酸素運動に分類される。

Active warm-up は身体活動を伴い、筋温増加や代謝・循環亢進に有効である^{70,93,94}。一方、Passive warm-up は温熱刺激など外界からの物理的刺激を用いたウォームアップであり筋温上昇に効果的である^{55,70,93-95}。

有酸素運動直後の筋力向上には主に筋温の増加が関与する^{88,90}。また、有酸素運動後に生じる筋温の増加には、運動強度と運動時間が関係する。運動強度が高くなるほど筋温は大きく増加する^{88,90}。しかし、 $60\% \dot{V}O_{2\max}$ 以上の運動強度では、運動後に休息時間を設けなければ疲労により筋力低下が生じる^{90,96}。また、筋温は有酸素運動の開始直後から増加し、10～20 分間でプラトーとなる。よって、筋力向上には低強度で10～20 分間の有酸素運動が効果的であると考えられる。筋力向上に効果的な有酸素運動の一つとして自転車エルゴメーターを用いたペダリング運動がある⁹⁷。ペダリング運動は有酸素性代謝を用いた運動であり、体温上昇による筋力増強を期待することができる。また、腓腹筋は

ストレッチショートニングサイクルの影響を受け、ペダリング運動により筋活動が増加する¹⁰⁶。よって、足関節底屈筋の筋力向上を目的とする場合には、低強度での10分間のペダリング運動が効果的であることが考えられる。

最大随意収縮などの無酸素運動後には筋活動の亢進（PAP）により筋力が増加する⁹⁸。PAPとは筋収縮後に生じる筋活動の一時的な増加を意味している⁹⁹。Güllich et al.⁶⁹は最大等尺性筋収縮後には筋活動が増加し、筋力が向上することを報告している。運動後に生じる筋力の変化には、行った運動の関節角度、収縮様式、運動速度などが影響する。研究課題2においては、足関節底背屈0度位での最大等尺性収縮を用いて足関節底屈筋の筋力測定を実施する。よって、筋力測定と同様の肢位である足関節底背屈0度位にて最大等尺性運動を行うことで効果的に筋力増強を得られる可能性が考えられる。

以上より、低強度のペダリング運動と等尺性足関節底屈運動はともに足関節底屈筋の筋力向上に効果的である可能性が考えられる。また、先行研究はROMを用いてウォームアップ後の柔軟性の変化を検討しており、スティフネスや筋腱移行部移動量などを用いて、軟部組織伸展性の変化を検討したものはない。

よって、研究課題2の目的はActive warm-upとPassive warm-upが足関節底屈筋の柔軟性及び筋力に及ぼす影響を検討することである。

4-2. 方法

4-2-1. 対象者

対象は運動習慣のない健常男性 14 名（年齢 23.1 ± 2.6 歳，身長 172.7 ± 5.6 cm，体重 64.5 ± 7.0 kg）とし，対象筋は利き足の腓腹筋とした．除外基準は女性，神経障害の既往がある者，下肢に手術歴がある者とした．本研究はヘルシンキ宣言に則り実施した．全ての対象者には実験の趣旨や研究方法に関する説明を行った．また，実験への参加は任意であること，実験への参加を途中で取り止めたとしても何ら不利益を生じることが無いことを説明し，研究の参加に関する同意を得た．また，本研究は事前にびわこ成蹊スポーツ大学倫理委員会の承認を得た上で実施した（承認番号 132）．

4-2-2. 実験プロトコル

Active warm-up と Passive warm-up が柔軟性と筋力に及ぼす明らかにするために，図 4 に示す手順で実験を行った．全ての対象者はランダムな順番で 3 種類のウォームアップを行い，前後で柔軟性測定と筋力測定を実施した．各実験は 1 週間の期間をおいて行い，対象者は合計で 3 回実験に参加した．実験中は実験室の室温を 25 度に維持した．

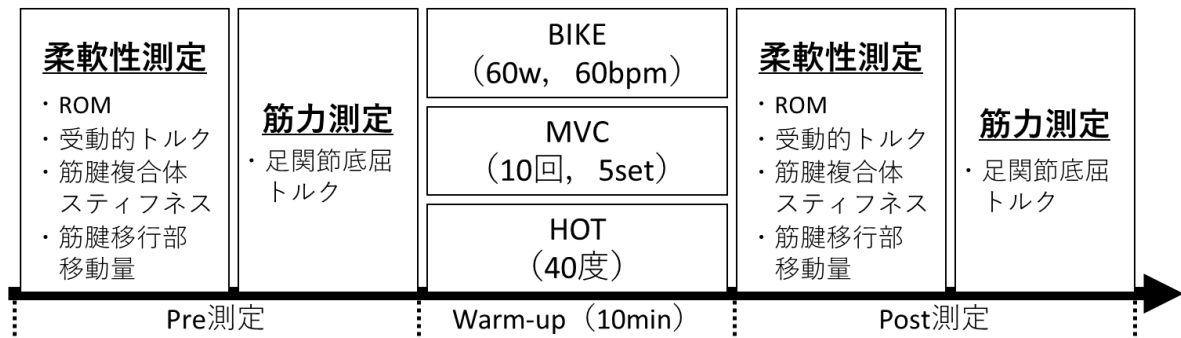


図 4. 研究課題 2 の実験手順

ROM : range of motion

4-2-3. ウォームアップ

本研究では、2 種類の Active warm-up と 1 種類の Passive warm-up を実施した。全てのウォームアップは 10 分間で実施した。

BIKE：自転車エルゴメーターを用いて、10 分間のペダリング運動（60W, 60bpm）を実施した。運動負荷と回転数は一定になるよう運動を通して確認した。

MVC：等尺性足関節底屈運動を用いた無酸素運動を実施した（1 セット 10 回，5 セット）。全ての対象者は最大努力下で 3 秒間の等尺性足関節底屈運動 10 回実施した。各運動間には 3 秒間の休息を設けた。また，10 回を 1 セットとし，セット間レストを 1 分間にセットし，合計 5 セット実施した。

HOT：40℃の温水に下腿部を浸すことで対象となる腓腹筋に温熱刺激を加えた。

4-2-4. 柔軟性測定

柔軟性の測定項目は，ROM，受動的トルク，筋腱複合体スティフネス，筋腱移行部移動量とした。測定には，研究課題 1 で用いた等速性筋力測定装置および超音波診断装置を用いた。柔軟性測定の方法及び各測定項目の算出方法は研究課題 1 と同様であった。

4-2-5. 足関節底屈トルク

等尺性筋力を評価するために柔軟性測定後に最大努力下での足関節底屈トルクを測定した。測定は等速性筋力測定装置を用いて行い、膝関節伸展位、足関節底背屈 0 度の肢位で、5 秒間の最大等尺性収縮を 2 回実施した。疲労の影響を排除するために各測定間には 2 分間の休息を設けた。2 回の測定のうち、分析には大きい方の値を用いた²⁴。

4-2-6. 統計分析

統計分析には反復測定二元配置分散分析を用いた [時間 (pre vs post) × 条件 (BIKE vs MVC vs HOT)]。事後検定は Bonferroni 法を用いて行った。全ての統計分析は SPSS statistics 21 (IBM, Japan) を用いて行い、有意水準は 5%未満とした。

4-3. 結果

4-3-1. ROM

時間と条件の間に有意な交互作用は認められなかった ($p = 0.08$, partial eta squared = 0.34, 表 3). また, 時間には有意な単純主効果がみられたのに対して ($p < 0.01$, partial eta squared = 0.73), 条件には認められなかった ($p = 0.13$, partial eta squared = 0.29). ROM は全てのウォームアップ後に増加した ($p < 0.05$) .

4-3-2. 受動的トルク

時間と条件の間に有意な交互作用は認められなかった ($p = 0.46$, partial eta squared = 0.06, 表 3). また, 時間には有意な単純主効果がみられたのに対して ($p < 0.01$, partial eta squared = 0.89), 条件には単純主効果は認められなかった ($p = 0.24$, partial eta squared = 0.10). 受動的トルクは全てのウォームアップ後に増加した ($p < 0.01$) .

4-3-3. 筋腱複合体スティフネス

時間と条件の間に有意な交互作用は認められなかった ($p = 0.38$, partial eta squared = 0.08, 表 3). また, 時間 ($p = 0.44$, partial eta squared = 0.07)

と条件 ($p = 0.73$, partial eta squared = 0.13) 共に有意な単純主効果は認められなかった.

4-3-4. 筋腱移行部移動量

時間と条件の間に有意な交互作用は認められなかった ($p = 0.22$, partial eta squared = 0.22, 表 3). また, 時間 ($p = 0.73$, partial eta squared = 0.01) と介入条件 ($p = 0.38$, partial eta squared = 0.15) 共に有意な単純主効果は認められなかった.

4-3-5. 足関節底屈トルク

時間と条件の間に有意な交互作用が認められた ($p < 0.05$, partial eta squared = 0.22, 表 3). 事後検定の結果, BIKE のみ足関節底屈トルクは増加し ($p < 0.05$), MVC ($p = 0.25$) と HOT ($p = 0.35$) においては変化していなかった.

表 3. ウォームアップ前後の各測定項目の変化

	BIKE		MVC		HOT	
	pre	post	pre	post	pre	post
ROM (度)	30.0 ± 5.9	33.2 ± 7.0*	28.2 ± 6.1	33.9 ± 6.3*	31.4 ± 6.3	33.9 ± 6.3*
受動的トルク (Nm)	28.6 ± 7.1	33.7 ± 8.0*	26.8 ± 5.7	32.6 ± 5.9*	29.7 ± 6.7	33.3 ± 6.5*
筋腱複合体スティフネス (Nm/度)	0.78 ± 0.38	0.77 ± 0.33	0.85 ± 0.34	0.8 ± 0.16	0.75 ± 0.15	0.81 ± 0.33
筋腱移行部移動量 (cm)	1.15 ± 0.42	1.26 ± 0.4	1.35 ± 0.32	1.34 ± 0.32	1.35 ± 0.35	1.21 ± 0.37
足関節底屈トルク (Nm)	106.4 ± 36.6	113.7 ± 38.7	104.9 ± 37.8	95.4 ± 35.5	101.4 ± 42.4	102.9 ± 38.3

平均値 ± 標準偏差. *p < 0.05 (vs pre). ROM: range of motion.

4-4. 考察

4-4-1. 柔軟性の変化に関して

ROM は全てのウォームアップ後に有意に増加した。先行研究においても、Active warm-up と Passive warm-up 後に ROM が増加することが報告されており、本研究はこれらの先行研究を支持する結果となった^{68, 107, 108}。ROM は軟部組織の伸展性と痛み耐性の影響を受け変化する^{18, 109}。本研究では、軟部組織の伸展性を筋腱複合体スティフネスと筋腱移行部移動量を用いて検討し、全てのウォームアップ後にこれらは変化しなかった。一方、痛み耐性の指標である受動的トルクは全てのウォームアップ後に有意に増加した。以上の結果から、3 種類のウォームアップ後に生じた ROM 増加は痛み耐性の増加によるものであると考えられる。先行研究において、SS 後は筋腱複合体スティフネス減少と筋腱移行部移動量増加が生じることが報告されている^{3, 12, 18, 24, 25}。Morse et al.²⁵ と Mizuno et al.²⁴ は 5 分間の SS 後には ROM 増加と共に筋腱複合体スティフネス減少と筋腱移行部移動量増加が生じることを報告している。また、Nakamura et al.¹⁸ は超音波診断装置を用いて SS 中の筋腱移行部移動量の経時的な変化を確認し、効果的に筋腱移行部移動量を増加させるためには 2 分間以上の SS がであることを報告している。一方、Mizuno et al.⁷¹ は動的ストレッチング後には ROM は増加するが、筋腱移行部移動量は変化しないことを報告している。本研究においても、10

分間の Active warm-up と Passive warm-up 後に ROM は増加したにも関わらず筋腱複合体スティフネスと筋腱移行部移動量は変化していなかった。以上より、SS を含まないウォームアッププログラム後は軟部組織の伸展性の変化が生じず、対象者の痛み耐性の増加により ROM が増加することが示唆された。

4-4-2. 筋力の変化に関して

筋力の指標として用いた足関節底屈トルクは BIKE 条件のみ増加し、MVC 条件および HOT 条件において変化しなかった。筋力に影響を及ぼす因子として筋の粘弾性がある^{16,23}。粘弾性が高く抵抗の高い組織は力の伝導効率が高く、筋などの収縮組織から生み出された力を効率よく伝えることができる大きな力発揮には有利であることが報告されている²³。本研究では、粘弾性の指標である筋腱複合体スティフネスは全ての条件で変化していなかった。これらの結果から、BIKE 条件で認められた筋力の増加は粘弾性以外の因子の影響を受けていることが考えられる。

4-5. 結論

研究課題 2 では、3 種類のウォームアップが足関節の柔軟性と筋力に及ぼす影響を比較・検討した。ウォームアップの種類に関わらず、痛み耐性が増加するこ

とで ROM が増加することが明らかとなった。また，筋力向上にはペダリング運動が効果的であることが示された。

第5章 研究課題3：SS後のウォームアップが柔軟性と筋力に及ぼす影響

5-1. 緒言

SSは柔軟性向上^{3, 25}と障害予防^{2, 63, 64, 110}に効果的である。しかし、SS後には筋力、ジャンプ能力、パワーなどのパフォーマンスが低下することが明らかとなっており、スポーツ競技前のウォームアップとしてSSを利用することの問題点が指摘されている^{5, 24, 66, 90, 111}。

スポーツ競技前に実施するウォームアッププログラムにはSSに加えて有酸素運動がある⁵。研究課題2の結果から、10分間の低強度のペダリング運動により筋力が向上することが明らかとなった。よって、SSとペダリング運動を併用することで、SSによる筋力の低下を改善することができる可能性が考えられる。

以上より、研究課題3の目的はSS後のペダリング運動が足関節底屈筋の筋力と柔軟性に及ぼす影響を明らかにすることである。

5-2. 方法

5-2-1. 対象者

対象は運動習慣のない健常男性15名（年齢23.9 ± 2.2歳，身長173.6 ± 5.8 cm，体重68.5 ± 8.8 kg）とし，対象筋は利き足の腓腹筋とした。除外基

準は神経障害の既往がある者、下肢に手術歴がある者とした。本研究はヘルシンキ宣言に則り実施した。全ての対象者には実験の趣旨や研究方法に関する説明を行った。また、実験への参加は任意であること、実験への参加を途中で取り止めたとしても何ら不利益を生じることが無いことを説明し、研究の参加に関する同意を得た。また、本研究は事前にびわこ成蹊スポーツ大学倫理委員会の承認を得た上で実施した（承認番号 132）。

5-2-2. 実験プロトコル

SS 後のペダリング運動が筋力と柔軟性に及ぼす影響を明らかにするために図 5 に示す手順で実験を行った。全ての対象者は 1 週間の期間をあけて 2 度実験に参加し、ランダムな順番で 2 種類の介入を行った（Control 条件、Bike 条件）。Control 条件では、5 分間の SS 後に座位による 10 分間の安静期間を設けた。一方、Bike 条件では、5 分間の SS 後に 10 分間の自転車エルゴメーターを用いたペダリング運動を行った。柔軟性測定と筋力測定は SS 前（pre-intervention）、SS 後（mid-intervention）、安静/自転車運動後（post-intervention）にそれぞれ実施した。全ての実験は室温 25℃の実験室にて行った。

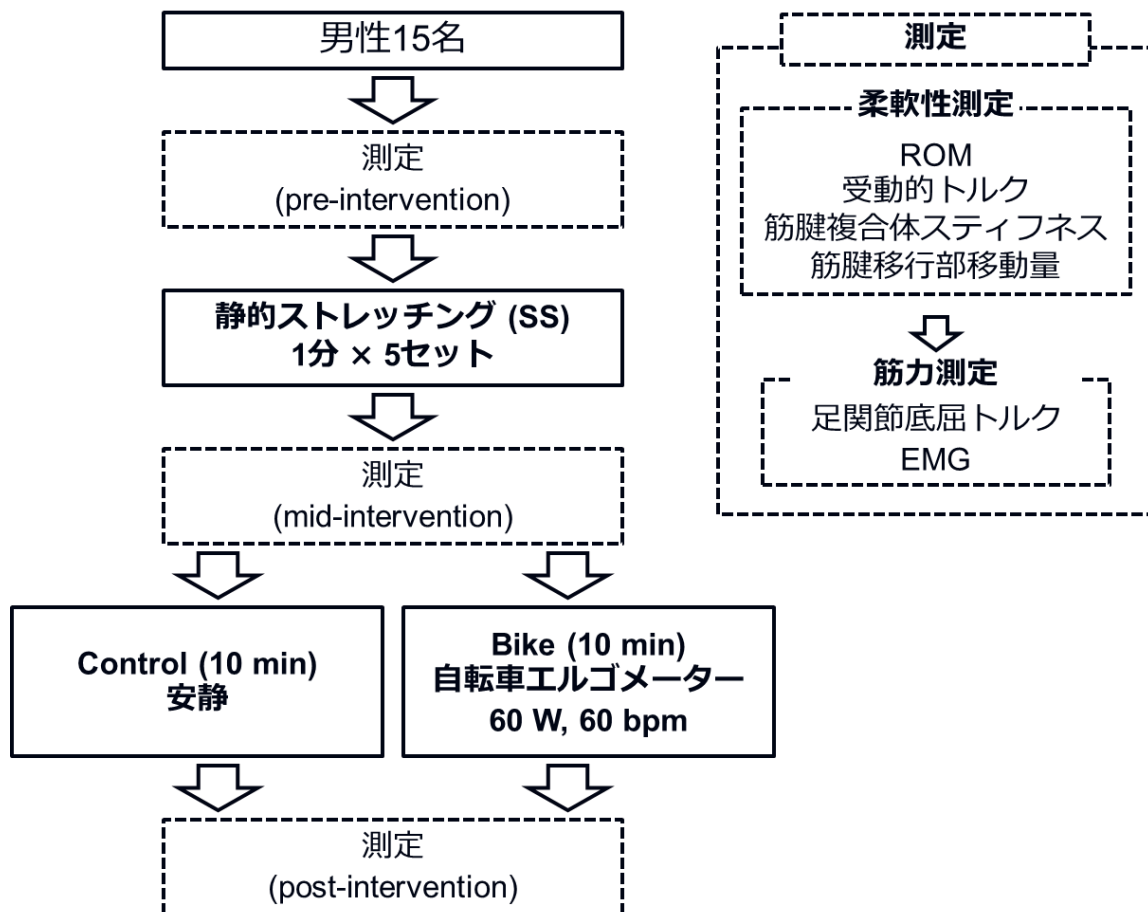


図 5. 研究課題 3 の実験手順

ROM: range of motion. EMG: electromyography

5-2-3. 柔軟性測定

柔軟性の測定項目は，ROM，受動的トルク，筋腱複合体スティフネス，筋腱移行部移動量とした．測定には研究課題 1，2 で用いた等速性筋力測定装置および超音波診断装置を用いた．柔軟性測定の方法および各測定項目の算出方法は研究課題 1，2 と同様であった．

5-2-4. 筋力測定

研究課題 2 同様，等速性筋力測定装置を用いて最大等尺性収縮時の足関節底屈トルクを測定した．対象者は Biodex 上で膝関節伸展位，足関節底背屈 0 度の肢位で，5 秒間の最大等尺性収縮を 2 回実施した．疲労の影響を排除するために各測定間には 2 分間の休息を設けた．2 回の測定のうち，分析には大きい方の値を用いた．

筋電図を用いて筋力測定時の筋活動を評価した．電極（ディスポーザブル型電極：13 mm，Ag/AgCl，S&ME，Tokyo，Japan）を腓腹筋内側頭の最大膨隆部に皮膚抵抗を軽減した後に貼付した．サンプリング周波数は 2kHz にて導出した．導出したデータは AD 変換し解析ソフト（LabChart，ADInstruments，Japan）を用いて解析した．全てのデータは 5~500Hz のバンドパスフィルタを用いて整流化した．筋活動量は root mean square を用いて算出し，分析には

対象者が最大の足関節底屈トルクを発揮した前後 1 秒間を用いた。

5-2-5. SS

利き足の腓腹筋を対象として反復性の SS を実施した²⁴。SS には等速性筋力測定装置を用いた。足関節底背屈 0 度から痛みがない範囲で最大の角度まで他動的に足関節を背屈し、その位置を 1 分間維持することで SS を実施した。1 分経過した後に足関節底背屈 0 度の角度まで戻した。本研究ではこの SS を 5 回繰り返し行うことで、計 5 分間の SS を実施した。なお、SS 実施中はリラックスするよう対象者に指示をした。

5-2-6. ペダリング運動

Bike 条件においては、SS 終了後すぐに自転車エルゴメーターを用いたペダリング運動を実施した。実施方法は研究課題 2 と同様であり、60W、60bpm の条件で 10 分間実施した。

5-2-7. 統計分析

反復測定二元配置分散分析を用いて時間 (pre-intervention vs mid-intervention vs post intervention) と条件 (Bike vs control) が柔軟性と

筋力に及ぼす影響を検討した。事後検定は Bonferroni 法を用いて行った。全ての統計分析は SPSS statistics 21 (IBM, Japan)を用いて行い、有意水準は 5%未満とした。

5-3. 結果

5-3-1. ROM

時間と条件の間に有意な交互作用が認められた ($p < 0.05$, partial eta squared = 0.22, 表 4). 両条件共に pre-intervention と比較して mid-intervention で有意に高値を示した ($p < 0.05$). Control 条件では mid-intervention と比較して post-intervention で低値を示したのに対して ($p < 0.05$), Bike 条件では差はなかった ($p = 0.16$). ROM は両条件共に pre-intervention と比較して post-intervention で高値を示した ($p < 0.05$).

5-3-2. 受動的トルク

時間と条件の間に有意な交互作用は認められなかった ($p = 0.17$, partial eta squared = 0.22, 表 4). また, 時間に関して有意な単純主効果が認められたのに対して ($p < 0.05$, partial eta squared = 0.31), 条件には認められなかった ($p = 0.50$, partial eta squared = 0.04). 受動的トルクは両条件共に pre-intervention と比較して mid-intervention で差はなかったが, Bike 条件のみ mid-intervention と比較して post-intervention で高値を示した ($p < 0.05$).

5-3-3. 筋腱複合体スティフネス

時間と条件の間に有意な交互作用は認められなかった ($p = 0.98$, partial eta squared = 0.00, 表 4). また, 時間に関して有意な単純主効果が認められたのに対して ($p < 0.05$, partial eta squared = 0.46), 条件には単純主効果は認められなかった ($p = 0.82$, partial eta squared = 0.00). 両条件共に pre-intervention と比較して mid-intervention で有意に低値を示し ($p < 0.05$), mid-intervention と post-intervention に差はなかった. 両条件共に pre-intervention と比較して post-intervention で低値を示した ($p < 0.05$).

5-3-4. 筋腱移行部移動量

時間と条件の間に有意な交互作用は認められなかった ($p = 0.11$, partial eta squared = 0.17, 表 4). また, 時間に関して有意な単純主効果が認められたのに対して ($p < 0.05$, partial eta squared = 0.74), 条件には単純主効果は認められなかった ($p = 0.42$, partial eta squared = 0.06). 両条件共に pre-intervention と比較して mid-intervention で有意に高値を示した ($p < 0.05$). Control 条件では mid-intervention と比較して post-intervention で有意に低値を示したのに対して ($p < 0.05$) Bike 条件では差はなかった (p

= 0.25). 両条件共に pre-intervention と比較して post-intervention で高値を示した ($p < 0.05$).

表 4. 静的ストレッチ後のペダリング運動による柔軟性の変化

	Control			Bike		
	pre-	mid-	post-	pre-	mid-	post-
	intervention	intervention	intervention	intervention	intervention	intervention
ROM (度)	26.8 ± 7.5	31.1 ± 7.4*	28.9 ± 7.6* [†]	25.0 ± 5.9	28.9 ± 7.4*	29.3 ± 6.5*
受動的トルク (Nm)	25.6 ± 7.3	27.1 ± 7.0	27.6 ± 7.5	24.4 ± 7.4	24.5 ± 6.9	28.7 ± 7.4 [†]
筋腱複合体スティフネス (Nm/度)	0.69 ± 0.19	0.52 ± 0.14*	0.54 ± 0.15*	0.68 ± 0.18	0.51 ± 0.15*	0.53 ± 0.18*
筋腱移行部移動量(cm)	1.11 ± 0.29	1.31 ± 0.31*	1.24 ± 0.33* [†]	1.11 ± 0.32	1.22 ± 0.32*	1.20 ± 0.32*

平均値 ± 標準偏差. *p < 0.05 (vs pre-intervention), [†]p < 0.05 (vs mid-intervention), ROM: range of motion.

5-3-5. 足関節底屈トルク

時間と条件の間に有意な交互作用が認められた ($p < 0.05$, partial eta squared = 0.25, 表 5). 両条件共に pre-intervention と比較して mid-intervention で低値を示した ($p < 0.05$). Control 条件では mid-intervention と比較して post-intervention で変化はなかったのに対して, Bike 条件では高値を示した ($p < 0.05$). Control 条件では pre-intervention と比べて post-intervention で低値を示したのに対して ($p < 0.05$), Bike 条件では高値を示した ($p < 0.05$). post-intervention において, 足関節底屈トルクは Bike 条件の方が Control 条件よりも高値を示した ($p < 0.05$).

5-3-6. EMG

時間と条件の間に有意な交互作用が認められた ($p < 0.05$, partial eta squared = 0.37, 表 5). 両条件共に, pre-intervention と比較して mid-intervention で低値を示した ($p < 0.05$). Control 条件では mid-intervention と比較して post-intervention で変化はなかったのに対して, Bike 条件では高値を示した ($p < 0.05$). Control 条件では pre-intervention と比べて post-intervention で低値を示したのに対して ($p < 0.05$), Bike 条件では高値を示した ($p < 0.05$). post-intervention において, EMG は Bike

条件の方が Control 条件よりも高値を示した ($p < 0.05$).

表 5. 静的ストレッチング後のペダリング運動による筋力の変化

	Control			Bike		
	pre-	mid-	post-	pre-	mid-	post-
	intervention	intervention	intervention	intervention	intervention	intervention
足関節底屈トルク (Nm)	111.6 ± 32.7	93.4 ± 38.0*	90.6 ± 33.3*	112.8 ± 33.6	93.1 ± 35.8*	118.5 ± 36.6*†#
EMG (μV)	116.8 ± 44.6	85.7 ± 46.2*	98.7 ± 45.9*	111.8 ± 45.3	83.1 ± 52.6*	122.9 ± 56.7*†#

平均値 ± 標準偏差. *p < 0.05 (vs pre-intervention), †p < 0.05 (vs mid-intervention), #p < 0.05 (vs control),

EMG: electromyography

5-4. 考察

5-4-1. 柔軟性の変化に関して

ROM は両条件共に 5 分間の SS 後に増加した。この研究結果は足関節底屈筋に対して 5 分間の SS を実施した先行研究の結果を支持するものである^{3, 15, 24, 28}。

ROM の増加は軟部組織伸展性の増加と痛み耐性増加により生じる¹⁹。本研究においては、両条件共に SS 後に軟部組織伸展性の指標である筋腱複合体スティフネスは低下したのに対して、痛み耐性の指標である受動的トルクは変化しなかった。これらの結果から、5 分間の SS 後に生じた ROM の増加は筋腱複合体スティフネス低下によるものであると考えられる。

ROM は Control 条件で安静後に減少したのに対して、Bike 条件でペダリング運動後に変化しなかった。また、筋腱複合体スティフネスは両条件共にそれぞれの介入後に変化しなかった。受動的トルクは Bike 条件でのみ増加した。研究課題 2 の結果から、本研究課題で用いたペダリング運動は筋腱複合体スティフネスには影響を及ぼさず、受動的トルクを増加させるものであることが明らかとなっている。以上より、SS 後にペダリング運動を実施することで対象者の痛み耐性が増加し、その結果、Bike 条件のみ SS により増加した ROM を維持することができたと考えられる。

5-4-2. 筋力の変化に関して

本研究では、SS 後に両条件共に足関節底屈トルクが約 17%低下した。Mizuno et al.¹⁵ は下腿三頭筋に対する 5 分間の SS 後に足関節底屈トルクが約 11%減少することを報告しており、本研究においても先行研究同様の筋力の低下が生じたことが分かる。SS 後に生じる筋力低下の原因には粘弾性低下と筋活動の減少がある^{16,64}。本研究において、筋腱複合体スティフネスと EMG は共に減少している。この結果は、SS 後に生じた足関節底屈トルクの減少は、粘弾性と筋活動が共に減少した結果生じたと考えられる。

Control 条件では足関節底屈トルクは安静後変化せず、その値は SS 前よりも低値であった。一方、Bike 条件ではペダリング運動後有意に増加し、その値は SS 前より高値であった。両条件共に筋腱複合体スティフネスは介入後変化しなかったのに対して、EMG は Bike 条件のみ増加した。これらの結果から、ペダリング運動により筋活動が増加したことで SS 後に低下した筋力が増加したと考えられる。

5-5. 結論

5 分間の SS 後には筋腱複合体スティフネスが低下したことで ROM が増加した。また、SS 後には筋腱複合体スティフネス減少と EMG 減少により足関節底屈

トルクの減少が生じた。SS 後に 10 分間のペダリング運動を実施した結果、EMG 増加により足関節底屈トルクは増加した。SS 後のペダリング運動により、SS による筋力低下を改善できることが明らかとなった。

第 6 章 研究課題 4 : SS とウォームアップの順序が柔軟性と筋力に及ぼす影響

6-1. 緒言

研究課題 3 では SS 後に 10 分間の自転車エルゴメーターを用いたペダリング運動を行い、足関節の柔軟性と筋力の変化を検討した。しかし、実際のスポーツ現場におけるウォームアップを考えると、SS 前に有酸素運動を行う場合や、SS の前後で有酸素運動を行う場合も存在している。現在のところ、SS とペダリング運動の順序が柔軟性や筋力に及ぼす影響は明らかとなっていない。研究課題 3 で得られた知見をスポーツ現場で応用可能なものにするためには、SS とペダリング運動の順序が筋力と柔軟性にどのような影響を及ぼすのかを明らかにする必要がある。

以上より、研究課題 4 の目的は、SS とペダリング運動の順序が足関節の柔軟性と筋力に及ぼす影響を明らかにすることとした。

6-2. 方法

6-2-1. 対象者

対象は運動習慣のない健常男性 15 名（年齢 23.3 ± 2.7 歳，身長 170.3 ± 6.5 cm，体重 64.9 ± 8.7 kg）とし，対象筋は利き足の腓腹筋とした。除外基準は神経障害の既往がある者，下肢に手術歴がある者とした。本研究はヘルシン

キ宣言に則り実施した。全ての対象者には実験の趣旨や研究方法に関する説明を行った。また、実験への参加は任意であること、実験への参加を途中で取り止めたとしても何ら不利益を生じることが無いことを説明し、研究の参加に関する同意を得た。また、本研究は事前にびわこ成蹊スポーツ大学倫理委員会の承認を得た上で実施した（承認番号 132）。

6-2-3. 実験プロトコル

SS とペダリング運動の順序が足関節底屈筋の柔軟性と筋力に及ぼす影響を明らかにするために図 6 に示す手順で実験を行った。全ての対象者は 1 週間の期間をあけて 3 度実験に参加し、ランダムな順番で 3 種類の実験を行った（SW 条件、WS 条件、WSW 条件）。全ての条件は 5 分間の SS と計 10 分間のペダリング運動から構成されている。SW 条件では、5 分間の SS 後に 10 分間の自転車運動を行った。WS 条件では、10 分間の自転車運動の後 5 分間の SS を行った。WSW 条件は自転車運動（5 分間）、SS（5 分間）、自転車運動（5 分間）の順番で介入を行った。前後で柔軟性と筋力を測定した。全ての実験は室温 25 度の実験室で行った。

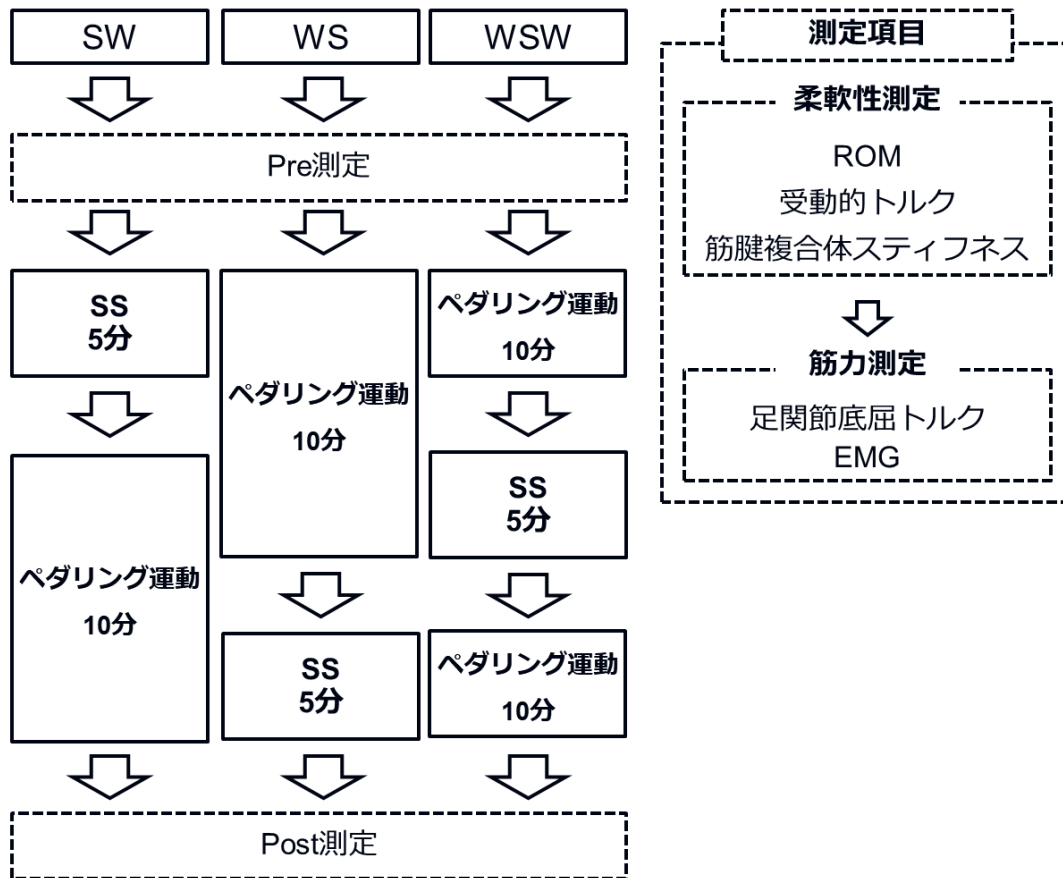


図 6. 研究課題 4 の実験手順

ROM: range of motion. EMG: electromyography

6-2-4. 柔軟性測定

柔軟性の測定項目は，ROM，受動的トルク，筋腱複合体ステイフネスとした．

測定機器および測定方法は研究課題 1，2，3 と同様であった．

6-2-5. 筋力測定

研究課題 2，3 同様，等速性筋力測定装置と筋電計を用いて最大等尺性収縮時の足関節底屈トルクおよび EMG を測定した．

6-2-6. SS

SS は研究課題 3 同様，反復性の SS を 5 分間（1 分，5 セット）行った．

6-2-7. ペダリング運動

研究課題 2，3 と同様の条件でペダリング運動を実施した．

6-2-8. 分析方法

反復測定二元配置分散分析を用いて時間（pre vs post）と条件（WS vs SW vs WSW）の影響を検討した．事後検定には Bonferroni 法を用いた．SPSS statistics 21（IBM, Japan）を用い，有意水準は 5%未満とした．

6-3. 結果

6-3-1. ROM

時間と条件の間に有意な交互作用はなかった ($p = 0.18$, partial eta squared = 0.01, 表 6). また, 時間には単純主効果が認められたが ($p < 0.01$, partial eta squared = 0.58), 条件には認められなかった ($p = 0.86$, partial eta squared = 0.01). 全ての条件で ROM は増加した ($p < 0.05$).

6-3-2. 受動的トルク

時間と条件の間に有意な交互作用はなかった ($p = 0.67$, partial eta squared = 0.02, 表 6). 時間には単純主効果がみられたが ($p < 0.01$, partial eta squared = 0.37), 条件にはみられなかった ($p = 0.78$, partial eta squared = 0.02). 全ての条件で受動的トルクは増加した ($p < 0.05$).

6-3-3. 筋腱複合体スティフネス

時間と条件の間に交互作用はなかった ($p = 0.31$, partial eta squared = 0.07, 表 6). 時間には単純主効果がみられたが ($p < 0.01$, partial eta squared = 0.53), 条件にはみられなかった ($p = 0.84$, partial eta squared = 0.01). 全ての条件で筋腱複合体スティフネスは減少した ($p < 0.05$).

表 6. SS とペダリング運動の順序が柔軟性に及ぼす影響

	SW		WS		WSW	
	pre	post	pre	post	pre	post
ROM (度)	33.3 ± 5.8	36.4 ± 6.6*	33.3 ± 6.9	38.9 ± 7.5*	34.4 ± 6.7	38.1 ± 7.0*
受動的トルク (Nm)	41.3 ± 9.8	46.7 ± 14.4*	42.3 ± 13.0	47.3 ± 13.0*	34.7 ± 13.3	41.8 ± 17.4*
筋腱複合体スティフネス (Nm/度)	1.52 ± 0.52	1.28 ± 0.41*	1.57 ± 0.63	1.23 ± 0.57*	1.39 ± 0.41	1.21 ± 0.42*

平均値 ± 標準偏差. *p < 0.05 (vs pre), ROM: range of motion.

6-3-4. 足関節底屈トルク

時間と条件の間に有意な交互作用が認められた ($p < 0.01$, partial eta squared = 0.43, 表 7). SW 条件と WSW 条件では介入後に足関節底屈トルクが増加したのに対して ($p < 0.05$,), WS 条件では減少した ($p < 0.05$).

6-3-5. EMG

二元配置分散分析の結果, 有意な交互作用が認められた ($p < 0.01$, partial eta squared = 0.34, 表 7). SW 条件 ($p < 0.05$) と WSW 条件 ($p < 0.05$) では介入後に EMG が増加したのに対して, WS 条件では減少した ($p < 0.05$).

表 7. SS とペダリング運動の順序が筋力に及ぼす影響

	SW		WS		WSW	
	pre	post	pre	post	pre	post
足関節底屈トルク (Nm)	105.5 ± 14.5	111.7 ± 15.8 ^{*†}	106.6 ± 27.0	98.7 ± 24.6 [*]	93.3 ± 31.6	100.7 ± 31.9 ^{*†}
EMG (μV)	74.6 ± 22.2	83.4 ± 26.0 ^{*†}	80.2 ± 31.1	68.1 ± 24.9 [*]	85.2 ± 28.3	96.5 ± 30.6 ^{*†}

平均値 ± 標準偏差. ^{*}p < 0.05 (vs pre), [†]p < 0.05 (vs WS post). EMG: electromyography

6-4. 考察

6-4-1. 柔軟性の変化に関して

ROM, 筋腱複合体スティフネス, 受動的トルクに関して, 条件と時間の間に有意な交互作用は認められなかった. また, 3 項目すべて時間にのみ有意な単純主効果が認められた. 全ての条件で ROM と受動的トルクは増加し, 筋腱複合体スティフネスは低下した. 研究課題 3 の結果から, SS 後にペダリング運動を実施することで, 筋腱複合体スティフネス減少と受動的トルク増加により ROM が増加することが明らかとなっている. これらの結果から, 5 分間の SS と 10 分間のペダリング運動はその順序に関わらず, 軟部組織伸展性と痛み耐性が共に増加することで ROM が増加することが明らかとなった. すなわち, 柔軟性向上を目的として SS とペダリング運動をウォームアップに取り入れる場合には, その順序は影響しないことが示唆された.

6-4-2. 筋力の変化に関して

足関節底屈トルクは SW 条件と WSW 条件で増加したのに対して, WS 条件では低下した. SS 後には筋腱複合体スティフネスと筋活動の低下により筋力の低下が生じる. SW 条件と WSW 条件では, 筋腱複合体スティフネスは低下し, EMG は増加していた. 一方, WS 条件では, 筋腱複合体スティフネスと EMG がともに低

下していた。研究課題 3 において、SS 後にペダリング運動を実施することで、SS 前よりも EMG が増加し、その結果、足関節底屈筋力が増加することが明らかとなった。本研究課題において、SS 後にペダリング運動を実施した SW 条件と WSW 条件では、研究課題 3 同様に EMG の増加により足関節底屈筋力が増加したと考えられる。一方、SS 後にペダリング運動を実施していない WS 条件においては筋腱複合体スティフネスと EMG の減少により足関節底屈筋力が低下したと考えられる。以上の結果から、SS とペダリング運動を併用する場合には、SS 後にペダリング運動を実施することで筋力が向上することが明らかとなった。

6-5. 結論

SS とペダリング運動の順序が足関節底屈筋の柔軟性と筋力に及ぼす影響を検討した。その結果、SS とペダリング運動の順序に関わらず軟部組織伸展性と痛み耐性が増加することで ROM が増加することが明らかとなった。また、SS 後にペダリング運動を実施することで筋力は向上することが明らかとなった。

第7章 総合討論

7-1. 本研究の目的

本研究は、SS 後に生じる筋力の低下を改善することができる介入方法を明らかにすることを目的とした。

7-2. 本研究で得られた成果

7-2-1. 研究課題1：対象者の筋腱複合体ステイフネスがSSの効果に及ぼす影響

対象者の筋腱複合体ステイフネスがSSの効果に及ぼす影響を検討した。対象者の筋腱複合体ステイフネスに関わらずSS後は軟部組織伸展性増加と痛み耐性増加によりROMは増加した。対象者の筋腱複合体ステイフネスがSSの効果に影響を及ぼさないことが明らかとなり、研究課題3、4でSSを用いる際の基礎的データを得ることができた。

7-2-2. 研究課題2：筋力向上に効果的なウォームアップ方法

Active warm-up と Passive warm-up が足関節の柔軟性と筋力に及ぼす影響を検討した。その結果、全てのウォームアップ後に痛み耐性増加によりROM増加が生じた。また、ペダリング運動後のみ筋力が増加した。この結果をもとに、筋力向上に有効な手段であるペダリング運動を以降の研究課題3、4で用いた。

7-2-3. 研究課題 3 : SS 後のペダリング運動が柔軟性と筋力に及ぼす影響

5 分間の SS 後に 10 分間の安静期間を設ける Control 条件, 5 分間の SS 後に 10 分間のペダリング運動を行う Bike 条件の 2 条件を用いて, SS 後のペダリング運動が足関節の柔軟性と筋力に及ぼす影響を検討した. 両条件共に SS 後には ROM 増加, 受動的トルク増加, 筋腱複合体スティフネス低下, 筋力低下, EMG 低下が生じた. Control 条件では 10 分間の安静後もすべての測定項目で SS 後と変化がなかった. 一方, Bike 条件においては 10 分間のペダリング運動後に筋力と EMG が増加し, その値は SS 前よりも高値を示した. すなわち, SS 後のペダリング運動を実施することで, SS により生じた筋力低下を改善することができると明らかとなった.

7-2-4. 研究課題 4 : SS とペダリング運動の順序が柔軟性と筋力に及ぼす影響

SS 後にペダリング運動を行う SW 条件, SS 前にペダリング運動を行う WS 条件, SS 前後でペダリング運動を行う WSW 条件の 3 条件を設定し, SS とペダリング運動の順序が足関節の柔軟性と筋力に及ぼす影響を検討した. その結果, 3 条件共に ROM 増加, 筋腱複合体スティフネス減少, 受動的トルク増加が生じた. また, SW 条件と WSW 条件では筋力と EMG が増加したのに対して, WS 条件では筋力と EMG は低下した. 以上の結果から, SS とペダリング運動の順序は柔

軟性の変化に影響を及ぼさないが、筋力を増加させるためには SS の後にペダリング運動を実施する必要があることが明らかとなった。

7-3. 本研究で得られた成果の意義

研究課題 1 では、対象者の筋腱複合体スティフネスが SS の効果に影響を及ぼさないことが明らかとなった。本研究結果から、先行研究において報告されている SS は対象者の元々の柔軟性に関係なく適応できる可能性が考えられる。また、今後 SS に関する研究を進めて行く上で対象者の元々の柔軟性がその効果に影響を及ぼさないことは重要な基礎的データである。

研究課題 2 では Active warm-up および Passive warm-up が足関節の柔軟性と筋力に及ぼす影響を検討した。その結果、全てのウォームアップ後に耐性が増加することで ROM は増加した。また、ペダリング運動により筋力が向上することが明らかとなった。これらの結果は、ペダリング運動が ROM と筋力を共に向上できる方法であるということを示唆するものである。本研究課題で用いたウォームアップ方法は実際のスポーツ現場においても利用されているものであり、本研究結果はウォームアップ方法を選択する際に重要な情報となるものであると考えられる。

SS 後に生じる筋力の低下は、スポーツ現場においてウォームアップの一環と

して SS を利用する際の大きな問題と考えられている。しかし、SS は柔軟性向上¹²と筋障害の予防¹¹²には有効であることが明らかとなっており、SS 後に生じる筋力低下を改善する方法の考案が望まれている。研究課題 3 では、SS 後にペダリング運動を実施することで、SS により生じた筋力低下が改善することが明らかとなった。SS 後に生じる筋力低下がペダリング運動により改善することができるということは、ウォームアッププログラムを計画する際に重要な情報となると考える。

実際のスポーツ現場を考えると、SS 前、SS 後、SS 前後でペダリング運動を実施することがある。研究課題 3 で得られた結果をよりスポーツ現場に応用可能なものとするため、研究課題 4 では、SS とペダリング運動の順序が柔軟性と筋力に及ぼす影響を検討した。その結果、SS とペダリング運動の順序に関わらず、軟部組織伸展性と痛み耐性が増加することで ROM が増加することが明らかとなった。また、SS 後にペダリング運動を実施した条件のみ筋力は増加し、ペダリング運動後に SS を実施した条件では筋力は低下した。すなわち、SS 後の筋力低下を改善するためには、SS 後にペダリング運動を実施する必要があることが明らかとなった。

本研究結果は、SS 後にペダリング運動を実施することで、SS により生じる筋力低下を改善することができることを明らかにしたものである。本知見は、

実際のスポーツ現場においてウォームアッププログラムを立案する際に非常に
有益な情報となるものである。

7-4. 研究の限界

本研究では、全ての研究課題において既往歴のない健常成人男性を対象とした。そのため、肉離れ損傷後の柔軟性低下など、既往歴により柔軟性が変化しているスポーツ選手において同様の結果が得られるかは定かではない。SS が障害予防やリハビリテーションに用いられていることを考えると、実際の障害に対する効果も検討をしていく必要がある。

研究課題 2, 3, 4 においてはペダリング運動を SS 後の介入手段として選択し、その効果を検討した。しかし、実際のスポーツ現場を考えると、より競技特異的なウォームアップが実施されている。本研究では、超音波診断装置や等速性筋力測定装置を実験に用いたため、単純で狭い範囲での運動に制限された。今後は、他の運動様式の効果を検証する必要があると考えられる。

客観的な粘弾性の指標としてスティフネスを用いた。スティフネスは先行研究を参考に、等速性足関節背屈時の角度-トルク曲線から算出した。しかし、粘性抵抗は速度や温度により変化をするため、等速性運動による測定では粘性抵抗の変化をとらえることができていない可能性が考えられる。

また、臨床的にみられる関節可動域制限の一因として筋緊張の亢進がある。筋紡錘の形態的・機能的な変化により伸張反射が誘発されやすくなり、少ない刺激でも過剰な筋収縮が惹起される。SS の即時的な効果の一つとして筋緊張の

抑制があげられる．本研究は，運動習慣のない健常成人男性を対象とし，十分にリラックスをした状態の測定である．そのため，過剰な筋収縮がある筋においても本研究同様の結果が得られるかどうかは不明である．

第8章 結語

本研究では、SS 後に生じる筋力の低下を改善することができる介入方法を明らかにすることを目的とした。

研究課題1：対象者の筋腱複合体スティフネスがSSの効果に及ぼす影響を検討

対象者の筋腱複合体スティフネスはSSの効果に影響を及ぼさないことが示された。

研究課題2：筋力向上に効果的なウォームアップ方法の検討

Active warm-up と Passive warm-up はともに痛み耐性を増加させることでROMを増加させることが明らかとなった。また、ペダリング運動により筋力が増加することが示された。

研究課題3：SS後のウォームアップが柔軟性と筋力に及ぼす影響の検討

SS後にペダリング運動を行うことで、SSにより低下した筋力が改善されることが明らかとなった。また、筋力増加には筋活動増加が関与することが示された。

研究課題 4 : SS とウォームアップの順番が柔軟性と筋力に及ぼす影響

SS による筋力低下を改善するためには，SS 後にペダリング運動を行う必要があることが明らかとなった．

謝辞

本研究を遂行し論文を作成するに当たり，懇切丁寧なご指導ご助言を賜りました，筑波大学体育系・竹村雅裕准教授に心から御礼申し上げます．また，実験の遂行，研究データの解釈など様々なご指導とご協力を頂きました新潟医療福祉大学・中村雅俊講師に厚く御礼申し上げます．また筑波大学宮川俊平教授，向井直樹准教授からは研究データの解釈や方向性に関してご助言頂きました．改めて厚く御礼申し上げます．

びわこ成蹊スポーツ大学・佃文子教授からは大学院生と大学助手の両立に関してご理解を頂き，多大なるご助言とご協力を頂きました．佃先生のお力添えがなければ，このような研究を遂行することはできなかったと感じております．本当にありがとうございました．びわこ成蹊スポーツ大学の助手の皆様には，実験の実施に関してご理解を頂き，研究に快く送り出していただきました．本当にありがとうございました．

本研究にご協力いただいた，筑波大学スポーツ医学研究室の皆様，竹村研究室の皆様には感謝申し上げます．また，被験者としてご協力いただいた，びわこ成蹊スポーツ大学の学生の皆様，同志社大学スポーツ健康科学部の学生の皆様にも心から感謝申し上げます．

参考文献

1. Alter MJ. *Science of Flexibility*. Human Kinetics; 2004.
2. Small K, Mc Naughton L, Matthews M. A systematic review into the efficacy of static stretching as part of a warm-up for the prevention of exercise-related injury. *Res Sports Med*. 2008;16(3):213-231. doi:10.1080/15438620802310784
3. Nakamura M, Ikezoe T, Takeno Y, Ichihashi N. Acute and prolonged effect of static stretching on the passive stiffness of the human gastrocnemius muscle tendon unit in vivo. *J Orthop Res*. 2011;29(11):1759-1763. doi:10.1002/jor.21445
4. Rohl1 JB. On “Increasing muscle extensibility...” Weppler CH, Magnusson SP. *Phys Ther*. 2010;90(6):438-449.
5. Behm DG, Chaouachi A. A review of the acute effects of static and dynamic stretching on performance. *Eur J Appl Physiol*. 2011;111(11):2633-2651. doi:10.1007/s00421-011-1879-2
6. Freitas SR, Vilarinho D, Vaz JR, Bruno PM, Costa PB, Mil-Homens P. Responses to static stretching are dependent on stretch intensity and duration. *Clin Physiol Funct Imaging*. August 2014.

doi:10.1111/cpf.12186

7. Little T, Williams AG. Effects of differential stretching protocols during warm-ups on high-speed motor capacities in professional soccer players. *J strength Cond Res.* 2006;20(1):203-207. doi:10.1519/R-16944.1
8. LaRoche DP, Connolly DAJ. Effects of Stretching on Passive Muscle Tension and Response to Eccentric Exercise. *Am J Sports Med.* 2006;34(6):1000-1007. doi:10.1177/0363546505284238
9. Konrad A, Stafilidis S, Tilp M. Effects of acute static, ballistic, and PNF stretching exercise on the muscle and tendon tissue properties. *Scand J Med Sci Sports.* July 2016. doi:10.1111/sms.12725
10. 武内孝祐, 佃文子. スポーツ現場におけるストレッチ実施状況の調査. 理学療法学. 2017;1287. doi:10.14900/CJPT.2016.1287
11. Anderson B. STRETCHING. shelter publications, Bolinas.
12. Nakamura M, Ikezoe T, Takeno Y, Ichihashi N. Effects of a 4-week static stretch training program on passive stiffness of human gastrocnemius muscle-tendon unit in vivo. *Eur J Appl Physiol.*

- 2012;112(7):2749-2755. doi:10.1007/s00421-011-2250-3
13. Harvey LA, Katalinic OM, Herbert RD, Moseley AM, Lannin NA, Schurr K. Stretch for the treatment and prevention of contracture: an abridged republication of a Cochrane Systematic Review. *J Physiother.* 2017;63(2):67-75.
doi:10.1016/j.jphys.2017.02.014
 14. Trudel G, Uhthoff HK. Contractures secondary to immobility: Is the restriction articular or muscular? An experimental longitudinal study in the rat knee. *Arch Phys Med Rehabil.* 2000;81(1):6-13. doi:10.1016/S0003-9993(00)90213-2
 15. Mizuno T, Matsumoto M, Umemura Y. Viscoelasticity of the muscle-tendon unit is returned more rapidly than range of motion after stretching. *Scand J Med Sci Sports.* 2013;23(1):23-30.
doi:10.1111/j.1600-0838.2011.01329.x
 16. Magnusson SP, Simonsen EB, Aagaard P, Kjaer M. Biomechanical responses to repeated stretches in human hamstring muscle in vivo. *Am J Sports Med.* 1996;24(5):622-628.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8883682>. Accessed November 11,

- 2013.
17. Magnusson SP, Simonsen EB, Aagaard P, Boesen J, Johannsen F, Kjaer M. Determinants of musculoskeletal flexibility: viscoelastic properties, cross-sectional area, EMG and stretch tolerance. *Scand J Med Sci Sports*. 1997;7(4):195–202.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9241023>. Accessed December 24, 2013.
 18. Nakamura M, Ikezoe T, Takeno Y, Ichihashi N. Time course of changes in passive properties of the gastrocnemius muscle-tendon unit during 5 min of static stretching. *Man Ther*. 2013;18(3):211–215. doi:10.1016/j.math.2012.09.010
 19. Guissard N, Duchateau J. Effect of static stretch training on neural and mechanical properties of the human plantar-flexor muscles. *Muscle Nerve*. 2004;29(2):248–255. doi:10.1002/mus.10549
 20. Kubo K, Kanehisa H, Fukunaga T. Effect of stretching training on the viscoelastic properties of human tendon structures in vivo. *J Appl Physiol*. 2002;92(2):595–601.
doi:10.1152/jappphysiol.00658.2001

21. Kataura S, Suzuki S, Matsuo S, et al. Acute Effects of the Different Intensity of Static Stretching on Flexibility and Isometric Muscle Force. *J strength Cond Res.* 2017;31(12):3403–3410. doi:10.1519/JSC.0000000000001752
22. Matsuo S, Suzuki S, Iwata M, et al. Acute effects of different stretching durations on passive torque, mobility, and isometric muscle force. *J strength Cond Res.* 2013;27(12):3367–3376. doi:10.1519/JSC.0b013e318290c26f
23. Watsford ML, Murphy AJ, McLachlan KA, et al. A prospective study of the relationship between lower body stiffness and hamstring injury in professional Australian rules footballers. *Am J Sports Med.* 2010;38(10):2058–2064. doi:10.1177/0363546510370197
24. Mizuno T, Matsumoto M, Umemura Y. Decrements in stiffness are restored within 10 min. *Int J Sports Med.* 2013;34(6):484–490. doi:10.1055/s-0032-1327655
25. Morse CI, Degens H, Seynnes OR, Maganaris CN, Jones DA. The acute effect of stretching on the passive stiffness of the human gastrocnemius muscle tendon unit. *J Physiol.* 2008;586(1):97–106.

- doi:10.1113/jphysiol.2007.140434
26. Yuen TJ, Orendurff MS. A comparison of gastrocnemius muscle-tendon unit length during gait using anatomic, cadaveric and MRI models. *Gait Posture*. 2006;23(1):112-117.

doi:10.1016/j.gaitpost.2004.12.007
 27. Herbert RD, Moseley AM, Butler JE, Gandevia SC. Change in length of relaxed muscle fascicles and tendons with knee and ankle movement in humans. *J Physiol*. 2002;539(Pt 2):637-645.

<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2290150&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>. Accessed November 14, 2013.
 28. Kato E, Kanehisa H, Fukunaga T, Kawakami Y. Changes in ankle joint stiffness due to stretching: The role of tendon elongation of the gastrocnemius muscle. *Eur J Sport Sci*. 2010;10(2):111-119.

doi:10.1080/17461390903307834
 29. Kato E, Vieillevoys S, Balestra C, Guissard N, Duchateau J. Acute effect of muscle stretching on the steadiness of sustained submaximal contractions of the plantar flexor muscles. *J Appl Physiol*. 2011;110(2):407-415. doi:10.1152/jappphysiol.01087.2010

30. Kay AD, Blazeovich AJ. Moderate-duration static stretch reduces active and passive plantar flexor moment but not Achilles tendon stiffness or active muscle length. *J Appl Physiol*. 2009;106(4):1249–1256. doi:10.1152/jappphysiol.91476.2008
31. Kubo K, Kanehisa H, Fukunaga T. Effects of transient muscle contractions and stretching on the tendon structures in vivo. *Acta Physiol Scand*. 2002;175(2):157–164. doi:10.1046/j.1365-201X.2002.00976.x
32. Kubo K, Kanehisa H, Kawakami Y, Fukunaga T. Influence of static stretching on viscoelastic properties of human tendon structures in vivo. *J Appl Physiol*. 2001;90(2):520–527.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11160050>. Accessed November 14, 2013.
33. Halbertsma JP, van Bolhuis AI, Göeken LN. Sport stretching: effect on passive muscle stiffness of short hamstrings. *Arch Phys Med Rehabil*. 1996;77(7):688–692.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8669996>. Accessed November 14, 2013.

34. McCrary JM, Ackermann BJ, Halaki M. A systematic review of the effects of upper body warm-up on performance and injury. *Br J Sports Med.* February 2015. doi:10.1136/bjsports-2014-094228
35. Bandy WD, Irion JM, Briggler M. The effect of time and frequency of static stretching on flexibility of the hamstring muscles. *Phys Ther.* 1997;77(10):1090-1096.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9327823>. Accessed November 14, 2013.
36. Brandenburg JP. Duration of stretch does not influence the degree of force loss following static stretching. *J Sports Med Phys Fitness.* 2006;46(4):526-534.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17119516>. Accessed July 20, 2016.
37. Donti O, Tsolakis C, Bogdanis GC. Effects of baseline levels of flexibility and vertical jump ability on performance following different volumes of static stretching and potentiating exercises in elite gymnasts. *J Sports Sci Med.* 2014;13(1):105-113.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24570613>. Accessed October 17,

- 2016.
38. Fowles JR, Sale DG, MacDougall JD. Reduced strength after passive stretch of the human plantarflexors. *J Appl Physiol.* 2000;89(3):1179–1188.

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10956367>. Accessed November 14, 2013.
 39. Gajdosik RL, Vander Linden DW, Williams AK. Influence of age on concentric isokinetic torque and passive extensibility variables of the calf muscles of women. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1996;74(3):279–286. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8897035>. Accessed November 14, 2013.
 40. Ruotolo C, Price E, Panchal A, et al. Loss of total arc of motion in collegiate baseball players. *J Shoulder Elbow Surg.* 2002;15(1):67–71. doi:10.1016/j.jse.2005.05.006
 41. Gajdosik RL, Allred JD, Gabbert HL, Sonsteng BA. A stretching program increases the dynamic passive length and passive resistive properties of the calf muscle-tendon unit of unconditioned younger women. *Eur J Appl Physiol.* 2007;99(4):449–

454. doi:10.1007/s00421-006-0366-7
42. Halbertsma JP, Göeken LN. Stretching exercises: effect on passive extensibility and stiffness in short hamstrings of healthy subjects. *Arch Phys Med Rehabil.* 1994;75(9):976-981.
- <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8085933>. Accessed December 20, 2013.
43. Feland JB, Myrer JW, Schulthies SS, Fellingham GW, Measom GW. The effect of duration of stretching of the hamstring muscle group for increasing range of motion in people aged 65 years or older. *Phys Ther.* 2001;81(5):1110-1117.
- <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11319936>. Accessed November 9, 2018.
44. Herda TJ, Ryan ED, Smith AE, et al. Acute effects of passive stretching vs vibration on the neuromuscular function of the plantar flexors. *Scand J Med Sci Sports.* 2009;19(5):703-713.
- doi:10.1111/j.1600-0838.2008.00787.x
45. Weir DE, Tingley J, Elder GCB. Acute passive stretching alters the mechanical properties of human plantar flexors and the

- optimal angle for maximal voluntary contraction. *Eur J Appl Physiol.* 2005;93(5-6):614-623. doi:10.1007/s00421-004-1265-4
46. Magnusson SP, Simonsen EB, Dyhre-Poulsen P, Aagaard P, Mohr T, Kjaer M. Viscoelastic stress relaxation during static stretch in human skeletal muscle in the absence of EMG activity. *Scand J Med Sci Sports.* 1996;6(6):323-328.

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9046541>. Accessed February 1, 2019.
 47. Weppeler CH, Magnusson SP. Increasing Muscle Extensibility: A Matter of Increasing Length or Modifying Sensation? *Phys Ther.* 2010;90(3):438-449. doi:10.2522/ptj.20090012
 48. Abellaneda S, Guissard N, Duchateau J. The relative lengthening of the myotendinous structures in the medial gastrocnemius during passive stretching differs among individuals. *J Appl Physiol.* 2009;106(1):169-177. doi:10.1152/jappphysiol.90577.2008
 49. Wilson JM, Hornbuckle LM, Kim J-S, et al. Effects of static stretching on energy cost and running endurance performance. *J Strength Cond Res.* 2010;24(9):2274-2279.

doi:10.1519/JSC.0b013e3181b22ad6

50. Ylinen J, Kankainen T, Kautiainen H, Rezasoltani A, Kuukkanen T, Häkkinen A. Effect of stretching on hamstring muscle compliance. *J Rehabil Med.* 2009;41(1):80–84. doi:10.2340/16501977-0283
51. Ayala F, De Ste Croix M, Sainz De Baranda P, Santonja F. Acute effects of static and dynamic stretching on hamstring eccentric isokinetic strength and unilateral hamstring to quadriceps strength ratios. *J Sports Sci.* 2013;31(8):831–839. doi:10.1080/02640414.2012.751119
52. Chaouachi A, Castagna C, Chtara M, et al. Effect of warm-ups involving static or dynamic stretching on agility, sprinting, and jumping performance in trained individuals. *J Strength Cond Res.* 2010;24(8):2001–2011. doi:10.1519/JSC.0b013e3181aeb181
53. Cramer JT, Beck TW, Housh TJ, et al. Acute effects of static stretching on characteristics of the isokinetic angle – torque relationship, surface electromyography, and mechanomyography. *J Sports Sci.* 2007;25(6):687–698. doi:10.1080/02640410600818416
54. Kistler BM, Walsh MS, Horn TS, Cox RH. The acute effects of

- static stretching on the sprint performance of collegiate men in the 60- and 100-m dash after a dynamic warm-up. *J Strength Cond Res.* 2010;24(9):2280-2284. doi:10.1519/JSC.0b013e3181e58dd7
55. Cosgray NA, Lawrance SE, Mestrich JD, Martin SE, Whalen RL. Effect of heat modalities on hamstring length: a comparison of pneumatherm, moist heat pack, and a control. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2004;34(7):377-384. doi:10.2519/jospt.2004.34.7.377
56. Samuel MN, Holcomb WR, Guadagnoli MA, Rubley MD, Wallmann H. Acute effects of static and ballistic stretching on measures of strength and power. *J Strength Cond Res.* 2008;22(5):1422-1428. doi:10.1519/JSC.0b013e318181a314
57. Siatras TA, Mittas VP, Mameletzi DN, Vamvakoudis EA. The duration of the inhibitory effects with static stretching on quadriceps peak torque production. *J Strength Cond Res.* 2008;22(1):40-46. doi:10.1519/JSC.0b013e31815f970c
58. Favero J-P, Midgley AW, Bentley DJ. Effects of an acute bout of static stretching on 40 m sprint performance: influence of baseline flexibility. *Res Sports Med.* 2009;17(1):50-60.

doi:10.1080/15438620802678529

59. Marek SM, Cramer JT, Fincher AL, et al. Acute Effects of Static and Proprioceptive Neuromuscular Facilitation Stretching on Muscle Strength and Power Output. *J Athl Train*. 2005;40(2):94-103. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15970955>. Accessed October 22, 2016.
60. Gergley JC. Latent effect of passive static stretching on driver clubhead speed, distance, accuracy, and consistent ball contact in young male competitive golfers. *J strength Cond Res*. 2010;24(12):3326-3333. doi:10.1519/JSC.0b013e3181e725e4
61. Hadala M, Barrios C. Different strategies for sports injury prevention in an America's Cup yachting crew. *Med Sci Sports Exerc*. 2009;41(8):1587-1596. doi:10.1249/MSS.0b013e31819c0de7
62. Ekstrand J, Gillquist J, Liljedahl SO. Prevention of soccer injuries. Supervision by doctor and physiotherapist. *Am J Sports Med*. 1983;11(3):116-120.

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6346912>. Accessed October 23, 2016.

63. Amako M, Oda T, Masuoka K, Yokoi H, Campisi P. Effect of static stretching on prevention of injuries for military recruits. *Mil Med.* 2003;168(6):442-446.

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12834132>. Accessed January 5, 2014.
64. McHugh MP, Cosgrave CH. To stretch or not to stretch: the role of stretching in injury prevention and performance. *Scand J Med Sci Sports.* 2010;20(2):169-181. doi:10.1111/j.1600-0838.2009.01058.x
65. Mizuno T, Matsumoto M, Umemura Y. Stretching-induced deficit of maximal isometric torque is restored within 10 minutes. *J strength Cond Res.* 2014;28(1):147-153.

doi:10.1519/JSC.0b013e3182964220
66. Simic L, Sarabon N, Markovic G. Does pre-exercise static stretching inhibit maximal muscular performance? A meta-analytical review. *Scand J Med Sci Sports.* 2013;23(2):131-148.

doi:10.1111/j.1600-0838.2012.01444.x
67. de Weijer VC, Gorniak GC, Shamus E. The effect of static stretch and warm-up exercise on hamstring length over the course of 24

- hours. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2003;33(12):727-733.
doi:10.2519/jospt.2003.33.12.727
68. O' Sullivan K, Murray E, Sainsbury D. The effect of warm-up, static stretching and dynamic stretching on hamstring flexibility in previously injured subjects. *BMC Musculoskelet Disord.* 2009;10:37. doi:10.1186/1471-2474-10-37
69. Güllich A, Schmidtbleicher D. MVC-induced short-term potentiation of explosive force. *New Stud Athl.* 1996;11(4):67-81.
https://www.sowi.uni-kl.de/fileadmin/sport/Download/Publikationen/Güllich_Arne/Güllich_Schmidtbleicher_1996_MVC-induced_short-term_potentialtion_of_expl....pdf. Accessed July 30, 2017.
70. Jutte LS, Merrick MA, Ingersoll CD, Edwards JE. The relationship between intramuscular temperature, skin temperature, and adipose thickness during cryotherapy and rewarming. *Arch Phys Med Rehabil.* 2001;82(6):845-850. doi:10.1053/apmr.2001.23195
71. Mizuno T. Changes in joint range of motion and muscle-tendon unit stiffness after varying amounts of dynamic stretching. *J Sports*

- Sci.* 2017;35(21):2157–2163. doi:10.1080/02640414.2016.1260149
72. Hubbard TJ, Carpenter EM, Cordova ML. Contributing factors to medial tibial stress syndrome: a prospective investigation. *Med Sci Sports Exerc.* 2009;41(3):490–496. doi:10.1249/MSS.0b013e31818b98e6
73. Witvrouw E, Bellemans J, Lysens R, Danneels L, Cambier D. Intrinsic risk factors for the development of patellar tendinitis in an athletic population. A two-year prospective study. *Am J Sports Med.* 2001;29(2):190–195. doi:10.1177/03635465010290021201
74. Kaufman KR, Brodine SK, Shaffer RA, Johnson CW, Cullison TR. The effect of foot structure and range of motion on musculoskeletal overuse injuries. *Am J Sports Med.* 1999;27(5):585–593. doi:10.1177/03635465990270050701
75. Malliaras P, Hogan A, Nawrocki A, Crossley K, Schache A. Hip flexibility and strength measures: reliability and association with athletic groin pain. *Br J Sports Med.* 2009;43(10):739–744. doi:10.1136/bjsm.2008.055749
76. Kaufman KR, Brodine SK, Shaffer RA, Johnson CW, Cullison TR. The

- effect of foot structure and range of motion on musculoskeletal overuse injuries. *Am J Sports Med.* 27(5):585–593.
- <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10496574>. Accessed October 22, 2016.
77. Kujala UM, Taimela S, Salminen JJ, Oksanen A. Baseline anthropometry, flexibility and strength characteristics and future low-back pain in adolescent athletes and nonathletes. *Scand J Med Sci Sports.* 2007;4(3):200–205. doi:10.1111/j.1600-0838.1994.tb00426.x
78. Pickering Rodriguez EC, Watsford ML, Bower RG, Murphy AJ. The relationship between lower body stiffness and injury incidence in female netballers. *Sport Biomech.* 2017;16(3):361–373. doi:10.1080/14763141.2017.1319970
79. Videman T, Sarna S, Battié MC, et al. The long-term effects of physical loading and exercise lifestyles on back-related symptoms, disability, and spinal pathology among men. *Spine (Phila Pa 1976).* 1995;20(6):699–709.
- <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7604346>. Accessed May 9, 2016.

80. Hennig EM, Lafortune MA. Relationships between Ground Reaction Force and Tibial Bone Acceleration Parameters. *Int J Sport Biomech.* 1991;7(3):303-309. doi:10.1123/ijsb.7.3.303
81. Grimston SK, Engsberg JR, Kloiber R, Hanley DA. Bone Mass, External Loads, and Stress Fracture in Female Runners. *Int J Sport Biomech.* 1991;7(3):293-302. doi:10.1123/ijsb.7.3.293
82. van Mechelen W, Hlobil H, Kemper HCG, Voorn WJ, de Jongh HR. Prevention of running injuries by warm-up, cool-down, and stretching exercises. *Am J Sports Med.* 1993;21(5):711-719. doi:10.1177/036354659302100513
83. Pope RP, Herbert RD, Kirwan JD, Graham BJ. A randomized trial of preexercise stretching for prevention of lower-limb injury. *Med Sci Sports Exerc.* 2000;32(2):271-277.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10694106>. Accessed July 24, 2018.
84. Pope R, Herbert R, Kirwan J. Effects of ankle dorsiflexion range and pre-exercise calf muscle stretching on injury risk in Army recruits. *Aust J Physiother.* 1998;44(3):165-172.

- <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11676730>. Accessed July 24, 2018.
85. Bixler B, Jones RL. High-school football injuries: effects of a post-halftime warm-up and stretching routine. *Fam Pract Res J*. 1992;12(2):131-139. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1621533>. Accessed October 19, 2018.
86. Lauersen JB, Bertelsen DM, Andersen LB. The effectiveness of exercise interventions to prevent sports injuries: a systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *Br J Sports Med*. 2014;48(11):871-877. doi:10.1136/bjsports-2013-092538
87. Shellock FG, Prentice WE. Warming-up and stretching for improved physical performance and prevention of sports-related injuries. *Sports Med*. 2(4):267-278. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3849057>. Accessed November 1, 2016.
88. Bishop D. Warm up I: potential mechanisms and the effects of passive warm up on exercise performance. *Sports Med*. 2003;33(6):439-454. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12744717>.

Accessed February 26, 2015.

89. Bishop D, Bonetti D, Dawson B. The influence of pacing strategy on V02 and supramaximal kayak performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2002;34(6):1041-1047.

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12048335>. Accessed March 9, 2015.
90. Bishop D. Warm up II: performance changes following active warm up and how to structure the warm up. *Sports Med.* 2003;33(7):483-498. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12762825>. Accessed March 9, 2015.
91. Mahieu NN, Witvrouw E, Stevens V, Van Tiggelen D, Roget P. Intrinsic Risk Factors for the Development of Achilles Tendon Overuse Injury. *Am J Sports Med.* 2006;34(2):226-235.

doi:10.1177/0363546505279918
92. O' Sullivan K, Murray E, Sainsbury D. The effect of warm-up, static stretching and dynamic stretching on hamstring flexibility in previously injured subjects. *BMC Musculoskeletal Disord.* 2009;10:37. doi:10.1186/1471-2474-10-37

93. Avelar NCP, Costa SJ, da Fonseca SF, et al. The effects of passive warm-up vs. whole-body vibration on high-intensity performance during sprint cycle exercise. *J Strength Cond Res.* 2012;26(11):2997-3003. doi:10.1519/JSC.0b013e318243fb48
94. Cè E, Margonato V, Casasco M, Veicsteinas A. Effects of stretching on maximal anaerobic power: the roles of active and passive warm-ups. *J Strength Cond Res.* 2008;22(3):794-800. doi:10.1519/JSC.0b013e31816a4353
95. Lehmann JF, Masock AJ, Warren CG, Koblanski JN. Effect of therapeutic temperatures on tendon extensibility. *Arch Phys Med Rehabil.* 1970;51(8):481-487.
96. Sargeant AJ, Dolan P. Effect of prior exercise on maximal short-term power output in humans. *J Appl Physiol.* 1987;63(4):1475-1480. doi:10.1152/jappl.1987.63.4.1475
97. Tomaras EK, MacIntosh BR. Less is more: standard warm-up causes fatigue and less warm-up permits greater cycling power output. *J Appl Physiol.* 2011;111(1):228-235. doi:10.1152/japplphysiol.00253.2011

98. Miyamoto N, Fukutani A, Yanai T, Kawakami Y. Twitch potentiation after voluntary contraction and neuromuscular electrical stimulation at various frequencies in human quadriceps femoris. *Muscle Nerve*. 2012;45(1):110–115. doi:10.1002/mus.22259
99. Sale DG. Postactivation potentiation: role in human performance. *Exerc Sport Sci Rev*. 2002;30(3):138–143.
100. Young WB, Jenner A, Griffiths K. Acute Enhancement of Power Performance From Heavy Load Squats. *J Strength Cond Res*. 1998;12(2):82. doi:10.1519/1533-4287(1998)012<0082:AEOPPF>2.3.CO;2
101. Morse CI. Gender differences in the passive stiffness of the human gastrocnemius muscle during stretch. *Eur J Appl Physiol*. 2011;111(9):2149–2154. doi:10.1007/s00421-011-1845-z
102. Folpp H, Deall S, Harvey LA, Gwinn T. Can apparent increases in muscle extensibility with regular stretch be explained by changes in tolerance to stretch? *Aust J Physiother*. 2006;52(1):45–50.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16515422>. Accessed December 20, 2013.

103. Maganaris CN, Paul JP. In vivo human tendon mechanical properties. *J Physiol.* 1999;521 Pt 1:307-313.
<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2269645&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>. Accessed November 14, 2013.
104. PR C. Prediction of gastrocnemius length from knee and ankle joint posture. *Biomechanics.* 1978.
http://www.myobase.org/index.php?lvl=notice_display&id=16426.
Accessed June 14, 2016.
105. Young R, Nix S, Wholohan A, Bradhurst R, Reed L. Interventions for increasing ankle joint dorsiflexion: a systematic review and meta-analysis. *J Foot Ankle Res.* 2013;6(1):46. doi:10.1186/1757-1146-6-46
106. Gregor RJ, Komi P V, Järvinen M. Achilles tendon forces during cycling. *Int J Sports Med.* 1987;8 Suppl 1:9-14.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3583522>. Accessed February 2, 2019.
107. Bonnar BP, Deivert RG, Gould TE. The relationship between isometric contraction durations during hold-relax stretching and

- improvement of hamstring flexibility. *J Sports Med Phys Fitness*. 2004;44(3):258-261. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15756164>. Accessed May 13, 2015.
108. Knight CA, Rutledge CR, Cox ME, Acosta M, Hall SJ. Effect of superficial heat, deep heat, and active exercise warm-up on the extensibility of the plantar flexors. *Phys Ther*. 2001;81(6):1206-1214. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11380276>. Accessed March 9, 2015.
 109. Magnusson SP. Passive properties of human skeletal muscle during stretch maneuvers. A review. *Scand J Med Sci Sports*. 1998;8(2):65-77. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9564710>. Accessed February 1, 2014.
 110. Malliaropoulos N, Papalexandris S, Papalada A, Papacostas E. The role of stretching in rehabilitation of hamstring injuries: 80 athletes follow-up. *Med Sci Sports Exerc*. 2004;36(5):756-759. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15126706>. Accessed November 14, 2013.
 111. Carvalho FLP, Carvalho MCGA, Simão R, et al. Acute effects of a

- warm-up including active, passive, and dynamic stretching on vertical jump performance. *J Strength Cond Res.* 2012;26(9):2447-2452. doi:10.1519/JSC.0b013e31823f2b36
112. McHugh MP, Johnson CD, Morrison RH. The role of neural tension in hamstring flexibility. *Scand J Med Sci Sports.* 2012;22(2):164-169. doi:10.1111/j.1600-0838.2010.01180.x